



**Diseño de Políticas de Reemplazo y Mantenimiento de Aires Acondicionados de
Expansión Directa Basadas en Programación Dinámica y Análisis de Ciclo de Vida de
Activos**

**Ramiro Antonio Bruges Fawcet
César Augusto Duarte Forero**

Tutor:

Katherine Palacio Salgar

**Universidad del Norte
Departamento de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Administrativa
División de Ingenierías
Barranquilla, 2019**

Tabla de Contenido

	Págs.
1. Presentación del Proyecto	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Antecedentes de la Empresa	9
1.2.1 Campus y Sedes Externas.....	9
1.2.2 Gestión de activos.	12
1.2.3 Mantenimiento.	14
1.3 Identificación del Problema	17
1.4 Justificación	21
1.5 Objetivos.....	23
1.5.1 Objetivo General.	23
1.5.2 Objetivos específicos.	23
1.6 Etapas Metodológicas del Proyecto.....	23
1.6.1 Etapa 1: Establecer los componentes de costo de mantenimiento y compra dentro del ciclo de vida de aires acondicionados de expansión directa.	24
1.6.2 Etapa 2. Levantamiento de información en las plataformas que actualmente cuenta la Universidad para su operación y mantenimiento.....	27
1.6.3 Etapa 3. Adaptar y solucionar el modelo basado en programación dinámica asociado a equipos de aire acondicionado de expansión directa basado en variables operativas y de elementos requeridos por el modelo.....	29
1.6.4 Etapa 4. Análisis de resultados para definir la política de recambio de equipos.....	30
1.6.5 Etapa 5. Elaborar plan de recambio y mantenimiento de equipos basado en las políticas definidas, información recolectada y resultados de solución del modelo.....	31
1.7 Alcance	32
1.8 Productos del Proyecto	33
2. Marco de Referencia	34
2.1 Marco Conceptual	34
2.2 Marco Teórico.....	38
2.2.1 Mantenimiento	38

2.2.2	Gestión de activos	44
2.2.3	Reemplazo de equipos.....	51
2.2.4	Optimización y programación dinámica	54
2.3	Análisis del Marco de Referencia.....	58
3.	Desarrollo de la metodología.....	60
3.1	Definición de variables que inciden en la decisión	60
3.1.1	Variables de Riesgo.....	60
3.1.2	Parámetros de desempeño – Condiciones de operación.....	62
3.1.3	Parámetros de Costo.	64
3.2	Caracterización de las variables o parámetros de decisión.....	66
3.2.1	Variables de Riesgo.....	67
3.2.2	Parámetros de desempeño.....	68
3.2.3	Parámetros de Costo.	72
3.2.4	Análisis descriptivo de los parámetros	75
3.3	Aplicación del modelo.....	76
3.3.1	Supuestos del modelo	76
3.3.2	Parámetros, elementos del modelo y función.....	77
3.3.3	Solución del modelo	80
3.3.4	Resultados del modelo	89
3.3.5	Otros escenarios de aplicación de Programación dinámica	90
3.3.6	Análisis de resultados	103
4.	Políticas y plan de recambio de equipos de expansión directa.....	110
5.	CONCLUSIONES	117
	Referencias	121

Lista de Figuras

	Págs.
Figura 1. Población total de pregrado matriculada por semestre, serie 2014-2018.	11
Figura 2. Organigrama de la Vicerrectoría Administrativa y Financiera.	12
Figura 3 Interacción de las áreas de servicios administrativos en el ciclo de vida de los equipos....	13
Figura 4. Familias de equipos utilizadas en plataforma de mantenimiento – Universidad del Norte	15
Figura 5. Pareto de servicios recibidos en la sección de mantenimiento.	16
Figura 6. Toneladas de Refrigeración en sistemas de expansión directa en la Universidad del Norte, serie 2009-2018.....	18
Figura 7. Presupuesto en equipos nuevos por cambio por vida útil 2015-2018 (Pesos).....	20
Figura 8. Fuentes de información para datos de equipos. Etapa 2.	28
Figura 9. Red de decisión basada en programación dinámica.....	30
Figura 10. Modelo organizacional de Henry Ford Reformado.....	40
Figura 11. Sistemas de gestión de activos utilizados en la empresa colombiana.	46
Figura 12. Uso de herramientas informáticas para soportar y asegurar la gestión del mantenimiento.....	47
Figura 13. Ciclo de vida del activo.	47
Figura 14. Curva de la bañera.	50
Figura 15. Ejemplo de decisión tomada con base en costo, condición y riesgo de un equipo.	51
Figura 16. Alternativas para la toma de decisiones de mantener o disponer de un equipo.	59
Figura 17. Distribución según impacto consecuencia.	68
Figura 18. Distribución de equipos de acuerdo con refrigerante utilizado.	69

Figura 19. Distribución según edad del equipo.....	70
Figura 20. Distribución según horas de uso.	71
Figura 21. Distribución según vida útil.	72
Figura 22. Red del modelo propuesto.	80
Figura 23. Subproblema 1, etapa 7.	81
Figura 24. Subproblema 2, etapa 6.	82
Figura 25. Subproblema 3, etapa 5.	83
Figura 26. Subproblema 4, etapa 4.	84
Figura 27. Subproblema 5, etapa 3.	85
Figura 28. Subproblema 6, etapa 2.	86
Figura 29. Subproblema 7, etapa 1	87
Figura 30. Resultado de modelo para equipos de 1 Tr con operación estándar.	88
Figura 31 Solución para equipo con falla de alto costo ..	91
Figura 32. Red de modelo para escenario integrado	100
Figura 33. Resultado red para escenario integrado	102
Figura 34. Ventaja de la ejecución de mantenimiento preventivo para alargar la vida útil del equipo.....	104
Figura 35. Curva de costo óptimo para mantenimiento.....	105

Lista de Tablas

	Pág
Tabla 1. Áreas e indicadores de planta física del campus, serie 2014-2018.....	11
Tabla 2. Listado de Equipos de Aire Acondicionado expansión directa – Universidad del Norte.....	19
Tabla 3. Servicios atendidos vs valor para aires acondicionados de expansión directa – Universidad del Norte, 2018.	21
Tabla 4. Variables de segmentación.....	26
Tabla 5. Ejemplo de plan de recambio de equipos	31
Tabla 6. Parámetros de desempeño.....	63
Tabla 7. Parámetros de Costo	66
Tabla 8. Caracterización del parámetro Impacto / Consecuencia	67
Tabla 9. Resumen de valores por salvamento de acuerdo con toneladas de refrigeración por cada equipo.....	74
Tabla 10. Valor a nuevo para los equipos según toneladas de refrigeración	74
Tabla 11. Datos para equipo de una tonelada	79
Tabla 12. Solución para la etapa 6	83
Tabla 13. Solución para la etapa 5	84
Tabla 14 Solución para la etapa 4	85
Tabla 15 Solución para la etapa 3.	85
Tabla 16. Solución para la etapa 2	86
Tabla 17. Solución para la etapa 1.....	87
Tabla 18. Resultado final para un equipo de 1 tonelada de refrigeración con operación estándar.	88
Tabla 19. Resultados para equipos de operación 24 horas	89
Tabla 20. Resultados para equipos de operación Estándar 1-5 Toneladas de refrigeración.....	89

Tabla 21. Resultados para equipos de operación Estándar 6-25 Toneladas de refrigeración.....	90
Tabla 22. Solución para equipo con falla de alto costo. Ejemplo 1	91
Tabla 23. Solución para equipo con falla de alto costo. Ejemplo 2	92
Tabla 24. Solución para equipo incluyendo consumo energético	93
Tabla 25. Solución para muestra de equipos 24 H con aumento de vida útil a 7 años	94
Tabla 26. Índices de precios al consumidor 2009-2018.....	95
Tabla 27 Costo energético de equipo de una tonelada	98
Tabla 28. Costo de falla de alto valor	99
Tabla 29. Datos para escenario consolidado	99
Tabla 30. Resultado análisis de etapas para para escenario integrado.....	101
Tabla 31. Comparativo en etapas para incrementos de energía diferentes	107
Tabla 32. Plan de renovación y mantenimiento de equipos de expansión directa	114

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 Introducción

A través del tiempo, muchas de las empresas dedicadas a la producción o servicios, han adoptado modelos administrativos que apunten a la eficiencia de los procesos de manera que se puedan estandarizar para obtener mayores beneficios o reducir costos inherentes a su naturaleza.

El área de mantenimiento es una de las áreas que influye en la eficiencia de los procesos de una compañía. Al contar con un buen plan de mantenimiento se logra maximizar la inversión llegando a la vida útil del equipo o la esperada por el proyecto. Usualmente en la práctica ese plan se aplica de acuerdo con las especificaciones del fabricante dejando de lado variables propias de cada entorno como los cambios bruscos de voltaje, las fallas por mala operación, o la aparición de fuentes externas que impactan negativamente en el funcionamiento de estos (polvo, golpes, entre otros) y en ambientes como el de la ciudad de Barranquilla la exposición a intemperie donde la salinidad afecta el desempeño de los equipos.

Es así como cobra importancia la implementación de un modelo que permita establecer el momento indicado en el cual se debe considerar la baja de un equipo o dar curso a su plan de mantenimientos preventivos. En ocasiones, las empresas no cuentan con una política que les permita establecer si un equipo debe ser reemplazado, o se debe seguir invirtiendo en su plan de mantenimiento, ocasionando de esta manera, descontrol en la reposición de estos

equipos, lo cual se traduce en ineficiencia de la ejecución del presupuesto derivando así en gastos improductivos, y convirtiéndose en un riesgo latente de pérdida de dinero. Por lo anterior, es importante, que toda empresa cuente con una política enfocada a la reposición de sus equipos como una estrategia para ser incluida dentro de su gestión de activos.

En este proyecto, se plantea la problemática en el reemplazo de forma cualitativa de equipos de expansión directa de la Fundación Universidad del Norte de la ciudad de Barranquilla; con el fin de establecer políticas que permitan la toma de decisiones entre mantener o cambiar equipos que se encuentran actualmente en operación con el fin de ser eficientes en el uso de los recursos asignados para inversión de la sección de mantenimiento.

1.2 Antecedentes de la Empresa

La Fundación Universidad del Norte es una institución de educación superior ubicada en el caribe colombiano, departamento del Atlántico, en la de ciudad Puerto Colombia, la cual cuenta con 13.431 estudiantes de pregrado y 2.389 estudiantes de postgrado incluidas especializaciones, maestrías y doctorados (Universidad del Norte, 2018, p. 18). Además de lo anterior, cuenta con servicios de educación continuada, centro de consultoría entre otros.

1.2.1 Campus y Sedes Externas.

La Universidad cuenta con un campus principal de 256.015 m² del cual se tiene un área construida de 77.309 m². Además de lo anterior, se cuenta con sedes fuera del campus como la sede académica en la ciudad de Santa Marta, Santa Rosa de Lima, Radioenlace, bodega en el edificio Suramericana y Consultorio Jurídico.

En su campus principal cuenta con 160 salones para la función académica, 98 laboratorios, un auditorio y un Coliseo Cultural y Deportivo, más de 6.000 m² en oficinas y áreas que prestan servicios a la comunidad.

Como se muestra en la Figura 1, la población total de pregrado matriculada por semestre, serie 2014-2018 (Universidad del Norte, 2018, p. 33), la universidad ha venido en un crecimiento importante a nivel de estudiantes matriculados pasando en 5 años de 9.937 estudiantes de pregrado en el segundo semestre de 2014 a 13.431 en el mismo periodo del año 2018 lo que equivale a un incremento del 35,1% de su población en pregrado. Al igual que con los estudiantes, se cuenta con otros indicadores de planta física como los mostrados en la Tabla 1, áreas e indicadores de planta física del campus, serie 2014-2018 (Universidad del Norte, 2018, p. 210), en donde se puede evidenciar incrementos del 24,2% en el área terreno y altos índices de construcción.

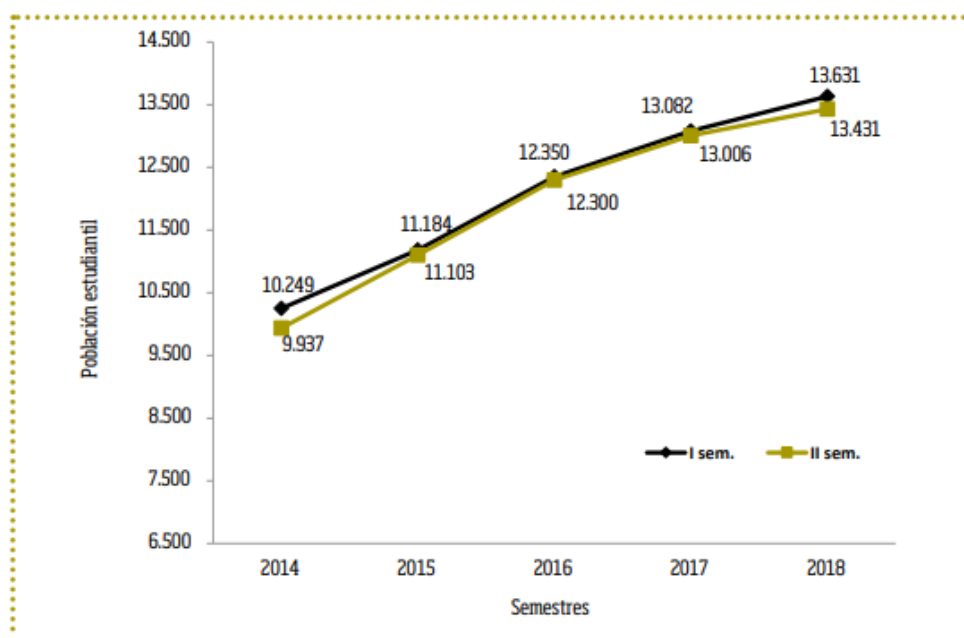


Figura 1. Población total de pregrado matriculada por semestre, serie 2014-2018.

Tomado de Universidad del Norte (2018). Boletín Estadístico 2018, p. 33.

Tabla 1. Áreas e indicadores de planta física del campus, serie 2014-2018.

Descripción	2014	2015	2016	2017	2018
Área terreno (m ²)	206.015	206.015	256.015	256.015	256.015
Área ocupación (m ²)	33.557	32.773	33.018	33.554	33.654
Área construida (m ²)	73.484	76.415	76.660	77.208	77.309
Área libre (m ²)	172.458	173.242	222.997	222.461	222.361
Área útil (m ²)	58.787	61.132	61.328	61.766	61.847
Índice de ocupación	16,3%	15,9%	12,9%	13,1%	13,1%
Índice de construcción	35,67%	37,09%	29,94%	30,16%	30,20%
Área de construcción por estudiante (m ²)	5,8	5,5	4,9	4,9	4,8
Área de ocupación por estudiante (m ²)	2,7	2,3	2,1	2,2	2,1
Área del terreno por estudiante (m ²)	16,3	14,8	16,4	15,9	15,9

Nota: Tomado de Universidad del Norte (2018). Boletín Estadístico 2018, p. 210.

1.2.2 Gestión de activos.

La gestión de activos en la Universidad del Norte está centralizada en la Dirección de Servicios Administrativos, como lo muestra el organigrama de la Figura 2. Esta dirección está conformada por las secciones de Compras, Mantenimiento, Servicios Generales, Proyectos de Infraestructura, Gestión Documental, Almacén y Servicios Audiovisuales. Es en esta dirección donde se planean, programan, organizan, dirigen y controlan las actividades administrativas de contratación de bienes y servicios de la Institución que permitan su óptimo funcionamiento con base en las políticas, objetivos, pautas y directrices internas de la Universidad.

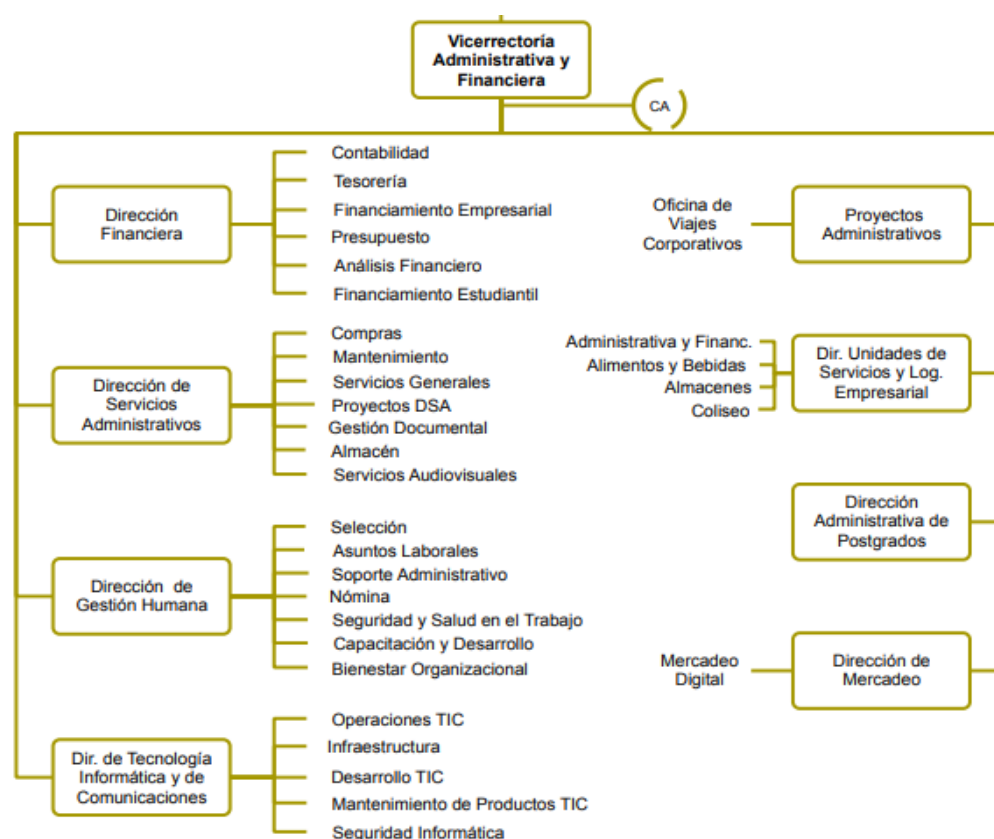


Figura 2. Organigrama de la Vicerrectoría Administrativa y Financiera.

Tomado de Universidad del Norte (2018). Boletín Estadístico 2018, p. 17.

El ciclo de vida de los activos inicia desde la necesidad generada por el usuario la cual es canalizada por la sección de proyectos de infraestructura quienes adelantan las etapas de diseñar, construir y comisionar para que posteriormente el usuario final opere los equipos y mantenimiento se encargue de realizar las actividades que permitan alargar la vida útil del bien. Finalmente, se culmina con la baja del activo en la sección de almacén donde se define la disposición del equipo el cual puede ser donado, vendido, reciclado o desechado según las condiciones en que se encuentre y las disposiciones que tengan para cada bien.

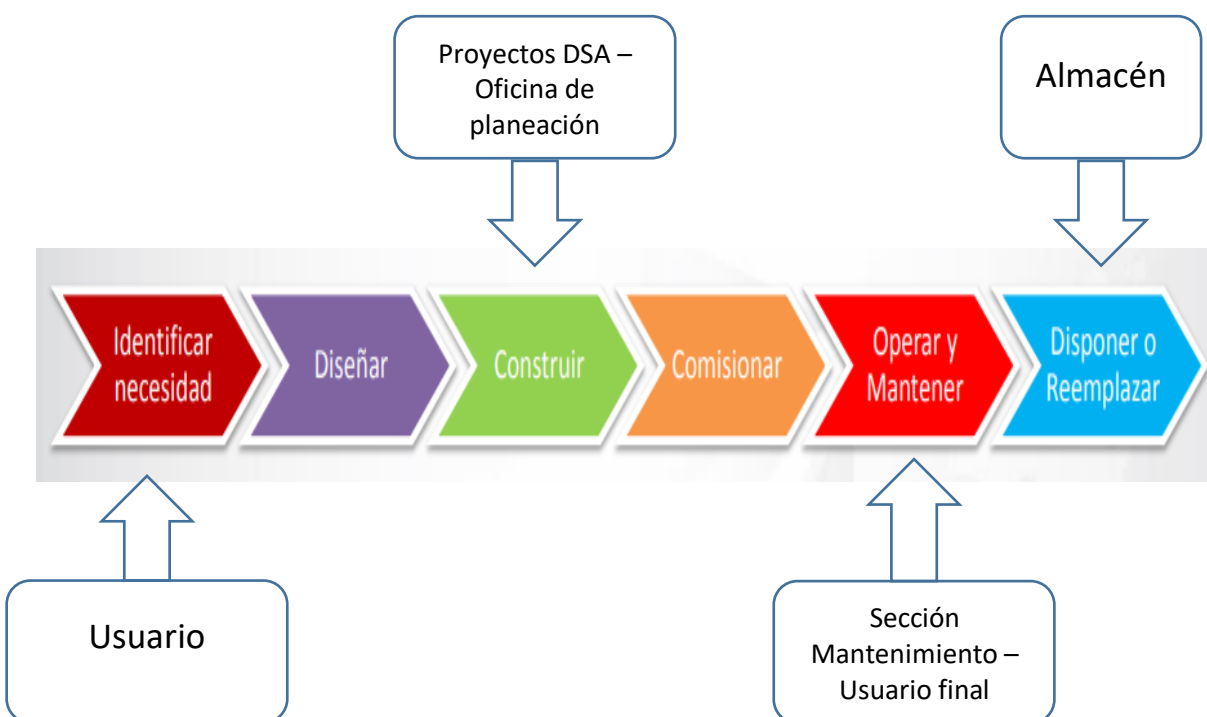


Figura 3 Interacción de las áreas de servicios administrativos en el ciclo de vida de los equipos.

Fuente: Elaboración propia

1.2.3 Mantenimiento.

La sección de mantenimiento de la Universidad del Norte tiene como objetivo el “programar y ejecutar las actividades relacionadas con el mantenimiento preventivo, correctivo y requerimientos de infraestructura física, muebles, maquinaria y equipos, garantizando su disponibilidad y funcionamiento, en servicio de la comunidad universitaria” (Universidad del Norte, 2019) y está conformada por un jefe de mantenimiento y tres coordinaciones, las cuales tienen a su cargo personal operativo para atender los planes de mantenimiento al igual que las solicitudes realizadas directamente por los usuarios.

El mantenimiento es controlado a través de dos plataformas tecnológicas, la primera que se le ha denominado SIGMA (Sistema Integrado de Mantenimiento) para el seguimiento al plan de mantenimiento preventivo y una segunda denominada ARANDA, para la atención de solicitudes realizadas directamente por funcionarios y estudiantes. Estos sistemas permiten que a cada activo se le asocien los casos solicitados por usuarios con sus costos, tiempos de atención y otras estadísticas propias de las actividades de mantenimiento.

En virtud de tener una estadística que permita un análisis más sectorizado, se han dividido en estas plataformas los activos e infraestructura en grupos como lo muestra la figura 4 a los cuales se les conoce como familias de equipos.

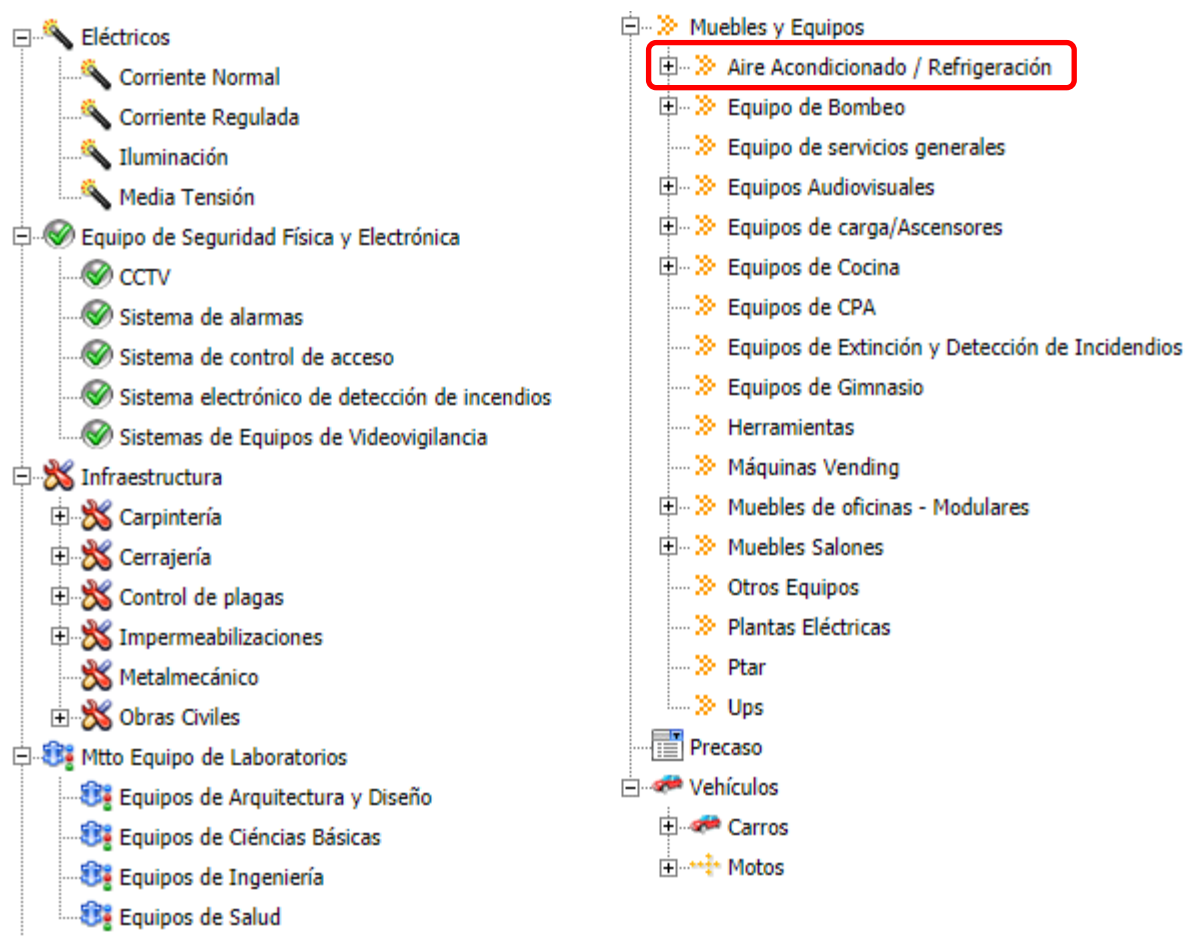


Figura 4. Familias de equipos utilizadas en plataforma de mantenimiento – Universidad del Norte

Dentro de estas familias de equipos se cuenta con la de aires acondicionados/refrigeración en la que se encuentra todo lo que implique frío ambiental y equipos grandes de refrigeración como los cuartos fríos. Este grupo actualmente es el más significativo como se puede ver en la Figura 5 al contar con 2005 solicitudes de servicio al año, representando el mayor valor de casos de mantenimiento con un 34% del total, además requiere de un control especial dado que su mantenimiento se maneja por outsourcing y es crítico en la prestación del servicio por las condiciones climáticas de la ciudad.

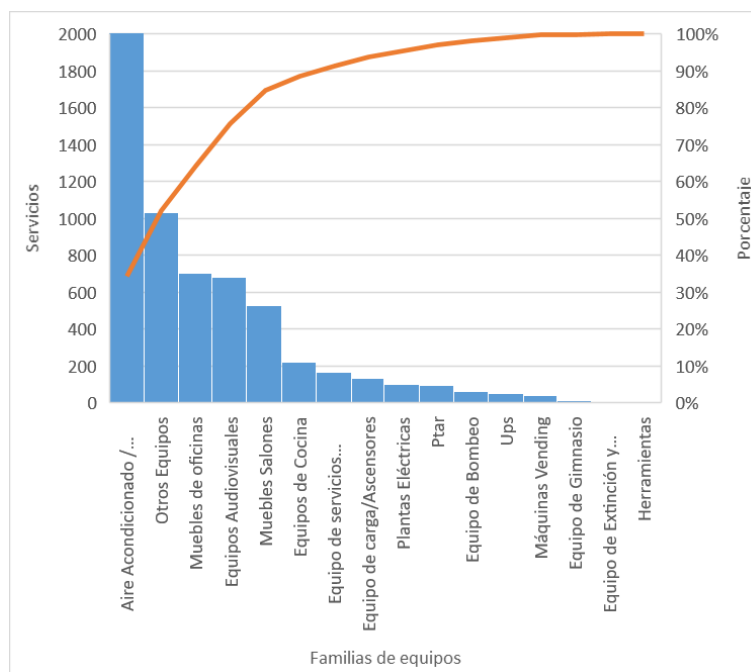


Figura 5. Pareto de servicios recibidos en la sección de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia

En el Pareto se puede ver que los servicios que conforman el 80% son los correspondientes a la familia de aires acondicionados, otros equipos, muebles de oficina y equipos audiovisuales. La familia de equipos de muebles de oficinas solo se atiende por correctivos y es muy diversa para poder aplicar la programación dinámica al igual que los correspondientes a otros equipos. Para el caso de equipos audiovisuales son equipos con valor bajo y de baja vida útil por lo que aplicar esta metodología sería de mayor dificultad al tener que subdividir la familia en muchos subgrupos para evaluar cuales equipos individuales podrían ser tenidos en cuenta con programación dinámica.

Para el caso específico del mantenimiento de los aires acondicionados se cuenta con la contratación de empresas especialistas en el sector, las cuales realizan mantenimientos

programados mensualmente a los equipos de expansión directa y ejecutan las actividades correctivas que sucedan en la vigencia del plan. El suministro de repuestos requeridos en estos mantenimientos es proporcionado por las mismas empresas y se registra en los sistemas de información de la Universidad.

1.3 Identificación del Problema

La Universidad del Norte cuenta con un sistema de presupuesto anual en el que cada dependencia presenta sus necesidades a la Vicerrectoría Administrativa y Financiera y posteriormente al análisis realizado por las directivas institucionales se asignan los recursos de acuerdo con las políticas administrativas y prioridades existentes. Dentro de esa proyección, la Universidad les ha dado especial importancia a los sistemas de aire acondicionado, permitiendo que a la fecha se tengan la totalidad de aulas y oficinas con acondicionamiento de aire.

Este propósito y el aumento de la planta física ha generado un incremento en las toneladas de refrigeración disponibles en el campus universitario como se puede ver en la Figura 6.

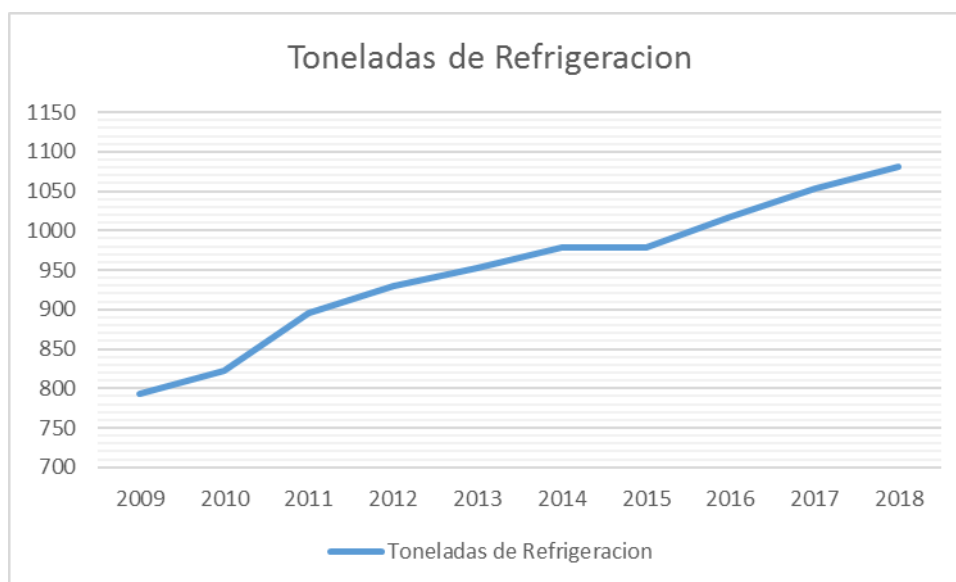


Figura 6. Toneladas de Refrigeración en sistemas de expansión directa en la Universidad del Norte, serie 2009-2018.

Fuente: elaboración propia.

El ciclo de vida de los equipos de aire acondicionado inicia con la concepción del proyecto, para poderlo llevar a cabo se realizan diseños de ingeniería según las necesidades y especialidades que se requieran. Se realiza la instalación con empresas de ingeniería representantes de marca o reconocidas en cada sector y se entregan a la sección de mantenimiento para que se realicen los controles y tareas necesarias que aseguren su correcta operación dentro de su vida útil. Actualmente, la Universidad cuenta con una empresa de mantenimiento con personal capacitado y con disponibilidad permanente en el campus para la atención de mantenimientos preventivos y correctivos de los equipos. El control se realiza a través de un software de mantenimiento donde se consignan todos los servicios que se hacen a cada equipo al igual que los costos asociados a los servicios realizados. La programación de mantenimiento preventivo se realiza mensualmente para los equipos de

expansión directa con desincrustes promedios de 6 meses. Para el año 2018 se dispone de un parque de 295 equipos de diferentes capacidades como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Listado de Equipos de Aire Acondicionado expansión directa – Universidad del Norte.

Capacidad en Toneladas de refrigeración (TR)	Cantidad de equipos (Und)
0,75	1
1	60
1,5	27
2	34
2,5	2
3	58
4	22
5	49
6	12
7,5	8
8	3
10	7
15	4
20	6
25	2
Total de equipos	295

Fuente: Elaboración propia.

Culminando el ciclo de vida del equipo, la sección de mantenimiento es la responsable de informar las necesidades de cambio de las máquinas cuando consideren que deben ser reemplazadas. Actualmente no se tiene una política de recambio clara y cuantificable. Las reposiciones de equipos se realizan teniendo en cuenta los niveles de eficiencia, nuevas tecnologías y mejoras presentadas por los fabricantes sin evaluar el gasto de mantenimiento de cada equipo a lo largo de su vida útil y condiciones de operación desaprovechando una

posible mejora anticipada que permita el ahorro en mantenimiento y energía de estos equipos. En la Figura 7 se muestra la inversión en reemplazo de equipos en los que el principal criterio de cambio ha sido el tipo de refrigerante. Actualmente el cambio de los equipos se decide en el momento de una falla de costo similar a un equipo nuevo en el que mediante una fórmula que es utilizada por aseguradoras se puede conocer un valor real del equipo y su demérito por uso empleando información puntual de valor a nuevo, edad y vida útil. El valor real que entrega la fórmula es comparado con el valor de reparación y en el caso que este último sea mayor se procede con el cambio de la máquina.

Con este método solo se tiene la posibilidad de decisión en el momento de la falla y no permite analizar tiempo antes de que ocurra la necesidad del correctivo si el equipo por los costos incurridos por operación deba cambiarse. La programación dinámica facilita esta toma de decisión al contar con información en diferentes etapas de la edad del equipo y según su histórico de reparaciones o costos que haya tenido.

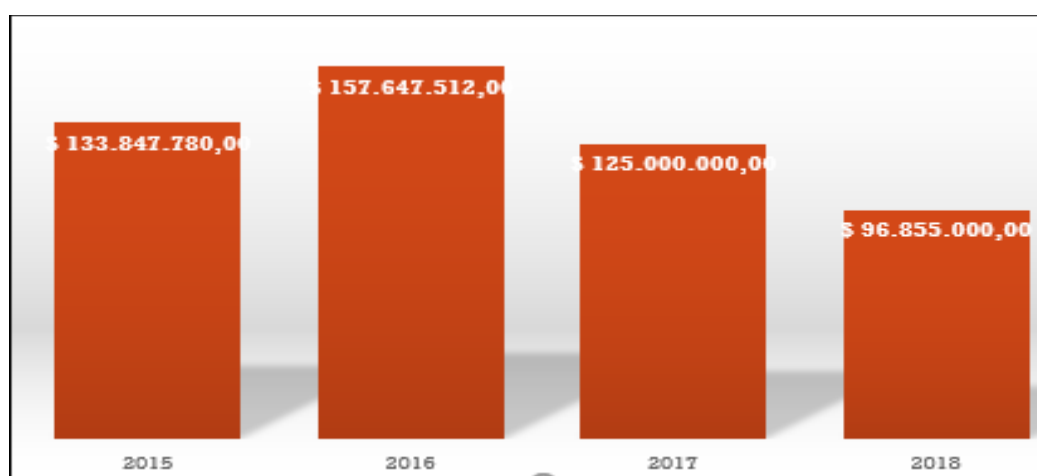


Figura 7. Presupuesto en equipos nuevos por cambio por vida útil 2015-2018 (Pesos).

Fuente: elaboración propia.

1.4 Justificación

La Universidad del Norte posee diversas familias de equipos, donde los aires acondicionados representan un elemento crítico en su operación dada las condiciones climáticas de la ciudad de Barranquilla.

Las máquinas de aire acondicionado de expansión directa son las más propensas a fallas y requerimientos por parte de funcionarios y profesores. Para el 2018, se presentaron 920 solicitudes y además se realizaron 3.540 servicios de mantenimiento preventivo para un total de 4.460 servicios de mantenimiento.

La operación y mantenimiento de los equipos finalmente se traduce en costos para la organización, donde en el año 2018 se presentó un costo de mantenimiento de \$396.834.359 en estos equipos sin incluir la energía consumida como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Servicios atendidos vs valor para aires acondicionados de expansión directa – Universidad del Norte, 2018.

Tipo de solicitud	Servicios atendidos	Valor
Incidentes	677	
Requerimientos	243	\$ 129.139.441
Preventivos	3.540	\$ 267.694.918
Total	4.460	\$ 396.834.359

Nota: Fuente: elaboración propia.

Dentro de las diferentes etapas del ciclo de vida de un equipo es muy importante definir el momento de disposición final con el fin de poder ser eficientes en el manejo de costos de operación y mantenimiento versus el recambio del equipo. Esta es la razón para

monitorear los valores invertidos en mantenimiento, vida útil sugerida por fabricantes, costos energéticos, valores de repuestos, nuevas tecnologías, valores de nuevas máquinas y otras variables según el tipo de equipo.

Actualmente en la Universidad del Norte no se tienen herramientas cuantitativas de gestión, que permitan determinar si el costo de mantenimiento es muy alto en comparación con el costo de compra, valor invertido en mantenimiento e instalación de nuevos equipos.

Usualmente el paso de operación y mantenimiento al disponer o reemplazar un equipo, se realiza por la necesidad de prestar el servicio ante un fallo de alto costo y se justifica la necesidad de inversión basado en el valor en libros (depreciación) que tenga el equipo en el sistema financiero de la Universidad.

Por otra parte, las inversiones solicitadas por el área de mantenimiento para reemplazo de equipos están basadas en cambios de tecnologías, por ejemplo, el cambio de refrigerante a nivel mundial para equipos comerciales de expansión directa.

En conclusión, se manejan reemplazos por daños de equipos o cambios obligados del mercado sin tener en cuenta variables como el costo de correctivos en el tiempo, afectación por la ubicación de los equipos, horas de uso, etc., que ayudarían a ser más eficientes en el buen uso de los recursos financieros asignados a la sección.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General.

Diseñar políticas de reemplazo y mantenimiento de equipos de aire acondicionado de expansión directa de la Universidad del Norte basado en programación dinámica y análisis de ciclo de vida de activos con el fin de ser eficientes en el uso de los recursos asignados para inversión de la sección de mantenimiento.

1.5.2 Objetivos específicos.

- Identificar y caracterizar parámetros que inciden en la toma de decisión de reemplazo de equipos de aire acondicionado de expansión directa.
- Adaptar y solucionar el modelo basado en programación dinámica de acuerdo a variables y parámetros definidos.
- Realizar análisis de los resultados del modelo de programación dinámica para proponer políticas relacionadas con el ciclo de vida de los equipos de aire acondicionado de expansión directa.
- Proponer un plan de renovación y mantenimiento de los equipos de expansión directa actualmente utilizado en la Universidad del Norte.

1.6 Etapas Metodológicas del Proyecto

Para el cumplimiento del objetivo de este proyecto, se propone el uso de programación dinámica basado en modelación de redes propuesto por Richard Bellman (Bellman R. 1955), para el cual se requiere la ejecución de las siguientes etapas:

- Etapa 1. Establecer los componentes de costo de mantenimiento y compra dentro del ciclo de vida de aires acondicionados de expansión directa.
- Etapa 2. Realizar el levantamiento de información de los parámetros del modelo en las plataformas que actualmente cuenta la Universidad para su operación y mantenimiento
- Etapa 3. Adaptar y solucionar el modelo basado en programación dinámica asociado a equipos de aire acondicionado de expansión directa basado en variables o parámetros operativos y de elementos requeridos por el modelo
- Etapa 4. Analizar los resultados y definir la política de recambio de equipos
- Etapa 5. Elaborar plan de recambio y mantenimiento de equipos basado en las políticas definidas, información recolectada y resultados de solución de la adaptación modelo.

1.6.1 Etapa 1: Establecer los componentes de costo de mantenimiento y compra dentro del ciclo de vida de aires acondicionados de expansión directa.

Para lograr el objetivo final de establecer políticas y un plan de recambio y mantenimiento de equipos de expansión directa se debe definir las variables y parámetros necesarios para segmentar la información obtenida de las bases de datos existentes y la necesaria para alimentar el modelo de programación dinámica. Contar con parámetros de capacidad, refrigerantes utilizados, horas de operación, entre otras, permitirá agrupar los

datos para definir similitudes o diferencias de acuerdo a estas características y de allí tomar decisiones para convertirlos en políticas.

Inicialmente se cuenta con tres criterios para definir las variables a utilizar los cuales son riesgo, desempeño y costo. Cada criterio tiene variables o parámetros que pueden ser obtenidos de las bases de datos y que pueden servir como variables o parámetros de segmentación o parámetros para el modelo de programación dinámica.

A continuación, se mostrarán cuales serán consideradas variables o parámetros de segmentación y cuales hacen parte del modelo de programación dinámica.

Características y parámetros de segmentación

La definición de características o parámetros que permitan agrupar los equipos por criterios es de importancia para poder segmentar la información y así sacar conclusiones particulares para un grupo característico. Siguiendo la teoría encontrada al respecto, se dividirán los parámetros en tres criterios: riesgo, desempeño y costos. Como se muestra en la Tabla 4. el nivel de criticidad para la organización hace parte del criterio de riesgo asociada al riesgo, mientras que la vida útil, edad del equipo, ubicación física y horas de operación diaria están asociadas al desempeño y finalmente los valores de preventivo, correctivo y salvamento asociados al costo.

Tabla 4. Variables de segmentación

Riesgo	Desempeño	Costo
Nivel de criticidad para la organización	Vida útil	Valor anual de preventivo
	Edad del equipo	Valor anual de correctivo
	Ubicación	Valor de salvamento
	Horas de uso	Valor a nuevo
	Capacidad	Costo total

Fuente: elaboración propia

Elementos para el uso de programación dinámica

Para el segundo grupo de parámetros, los asociados al modelo de programación dinámica, se deben establecer las etapas, alternativas y estados que permitirán mostrar las opciones de decisión.

-Etapas (Sub-Problemas): Los sub-problemas están definidos en cuanto a los puntos en el periodo de planeación en donde se pueden tomar decisiones con respecto a la actualización tecnológica del equipo. Para el caso específico de este trabajo, se manejarán etapas basadas en el tiempo y específicamente de acuerdo con los periodos de presupuesto de la Universidad el cual es anual, es decir que las decisiones que se plantearán en la modelación serán anuales. Lo anterior permitirá definir un presupuesto de los equipos a reemplazar

- Alternativas: Están determinadas por las decisiones que pueden tomarse en cuanto a los equipos. Teniendo en cuenta que la decisión se encuentra en la etapa del ciclo de vida de

operación y mantenimiento o de la transición entre esta y la de disposición final del equipo las alternativas estarían dadas por el reemplazo del equipo o continuar el mantenimiento. En el desarrollo del modelo deberá definirse si el overhaul puede ser tomado como parte de un mantenimiento o si se toma como una alternativa individual. En el caso específico de los aires acondicionados de expansión directa que tiene la Universidad no es válido el overhaul como opción debido a que los compresores que son la parte principal del equipo son sellados y no permite este tipo de mantenimiento, sin embargo para otros tipos de equipos como plantas de emergencia o chiller podría utilizarse esta opción.

- Estado: el estado en el cual se encuentra el recurso en cada etapa de la planeación que para el caso de este estudio sería estar antes de la vida útil sugerida por el fabricante o posterior a la misma.

1.6.2 Etapa 2. Levantamiento de información en las plataformas que actualmente cuenta la Universidad para su operación y mantenimiento.

Para el levantamiento de información se tendrá en cuenta las fuentes y software con las que cuenta la Universidad del cual se puede obtener información relevante para la definición de variables y elementos del modelo citados en la etapa anterior.

En la Figura 8 se muestran los diferentes sistemas con que cuenta la institución como insumo para el levantamiento de información, a continuación, se detalla que se obtendrá de cada plataforma:

- ARANDA: Se obtendrán datos de números de falla de equipos por año, intervenciones de mejora
- SIGMA: Todo lo correspondiente a costos de preventivos y correctivos, del sistema
- BANNER: Es el sistema financiero de la universidad y permitirá obtener información de vida útil para cada equipo, la fecha de puesta en operación, ubicaciones físicas, valor a nuevo.

Por último, la información se completará con fichas técnicas y una información levantada en campo que corresponde a horas de uso por cada equipo

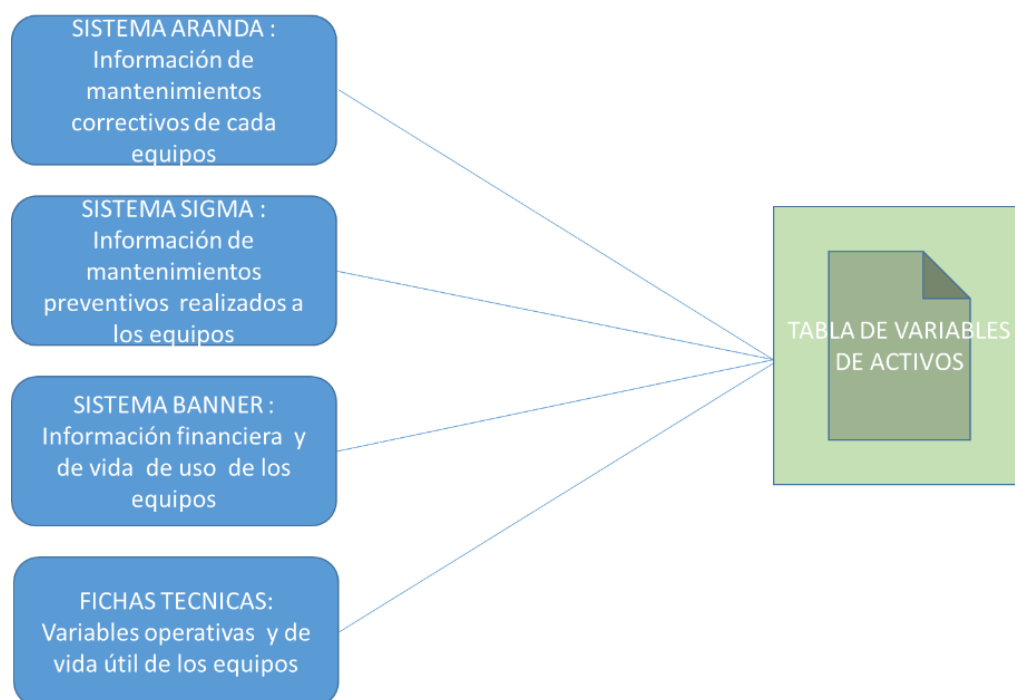


Figura 8. Fuentes de información para datos de equipos. Etapa 2.

Fuente: Elaboración propia

En esta etapa se debe realizar una validación de los datos, aunque la información se obtiene de bases de datos activas se realizarán confirmaciones con personal operativo para las ubicaciones y los costos de preventivo de acuerdo a contratos de años anteriores.

Finalmente se obtendrá una tabla de características y parámetros de activos que mediante tablas dinámicas de Excel permitirá segmentar la información como fue definido en la etapa 1. Estas serán objeto de una caracterización específica para la Universidad del Norte y sus equipos.

1.6.3 Etapa 3. Adaptar y solucionar el modelo basado en programación dinámica asociado a equipos de aire acondicionado de expansión directa basado en variables operativas y de elementos requeridos por el modelo.

Para la solución del problema se aplica el método de decisión de optimización de etapas denominado programación dinámica el cual se basa en el principio de optimalidad definido por Bellman (Bellman R. 1955), en el que daría una configuración similar a la Figura 8 permitiendo definir para cada año de decisión si el equipo se mantiene o se reemplaza. Esta modelación se puede realizar utilizando herramientas computacionales como Excel o software más especializado como Matlab. El uso de una u otra opción dependerá de lo extenso de la red a definir.

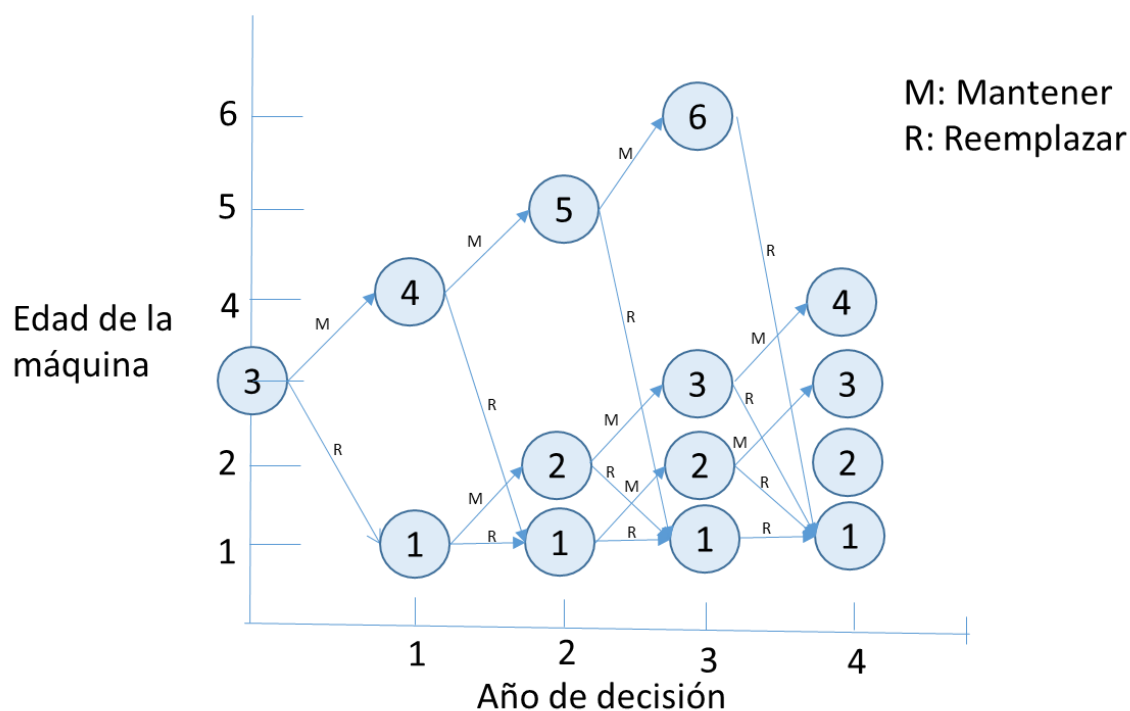


Figura 9. Red de decisión basada en programación dinámica.

Fuente: Elaboración propia

En el caso del ejemplo mostrado en la Figura 9, el equipo cuenta con tres años de edad en el momento de aplicar el modelo en donde tiene las opciones de mantener y llegar a su año 4 o si se decide reemplazar, en el que comenzaría en el año 1 un nuevo equipo. De la misma forma se aplica para cada una de estas soluciones hasta el horizonte de vida útil que, para el caso del ejemplo, son 4 años adicionales.

1.6.4 Etapa 4. Análisis de resultados para definir la política de recambio de equipos

El análisis de los resultados se realizará teniendo en cuenta las normativas internas como el manual de políticas administrativas, procedimientos establecidos en el sistema de

gestión de calidad para las secciones involucradas en el ciclo de vida del activo y operatividad de la institución de tal forma que se puedan establecer políticas para los casos en que la red obtenida sea cíclica o tenga un patrón definido para el grupo segmentado en la etapa 2. De esta forma se podrá generalizar el resultado y adoptarlo como la decisión óptima de solución para cuando este caso se repita. Finalizada esta etapa se tendrán definidas las políticas que puedan obtenerse del análisis de datos, el uso de programación dinámica o aspectos generales que sean relevantes de las etapas anteriores.

1.6.5 Etapa 5. Elaborar plan de recambio y mantenimiento de equipos basado en las políticas definidas, información recolectada y resultados de solución del modelo

De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa 3 y la política definida en la etapa 4 se elaborará una propuesta para el plan de cambio y mantenimiento de los equipos actualmente operativos para los siguientes 5 años. A continuación, se muestra en la Tabla 5. un ejemplo del posible planteamiento de recambio de equipos

Tabla 5. Ejemplo de plan de recambio de equipos

Estrategia	Actividad	Área responsable	Equipo	Edad (Años)	Año de cambio	Recursos financieros (Millones de pesos)	Vida útil propuesta (Años)
Actualización tecnológica	Cambio de equipo	Dirección servicios administrativos	Equipo A	2	2024	5	5
Cumplimiento vida útil	Cambio de equipo	Dirección servicios administrativos	Equipo B	3	2023	2	10
Cumplimiento legal	Cambio de equipo	Dirección logística	Equipo C	6	2020	20	5

Fuente: Elaboración propia.

1.7 Alcance

Se hace necesario definir el alcance de la solución del modelo planteado en esta investigación por lo que a continuación se delimita en sus puntos más importantes:

- El análisis del modelo de programación dinámica se enfocará en los aires de expansión, teniendo en cuenta que éstos son los tipos de aires que presentan un ciclo de vida menor y, por lo tanto, servicios de mantenimiento preventivo más frecuente.
- En el análisis de variables se incluirán los aires acondicionado del campus y las sedes externas; sede Santa Marta, Radioenlace, Santa Rosa de Lima, Bloque académico del Hospital Universidad del Norte, Consultorio Jurídico.
- El modelo a plantear se realizará para aquellos grupos de equipos de expansión directa con mayor criticidad y compromisos con la operación.
- El modelo de programación es una solución piloto del problema, por lo tanto, el objeto del proyecto no abarca una verificación de los resultados, ya que el tiempo no lo permite. De igual forma, no incluirá la implementación del plan a presentar.
- El modelo de programación dinámica se desarrollará sobre herramientas computacionales existentes, por lo tanto, no se tiene como objeto entregar una herramienta como solución
- La información a la cual se recurrirá para el desarrollo del modelo de programación dinámica será tomada de los datos históricos llevados por la Universidad en su software de mantenimiento y financiero. En caso de requerirse información que no se tenga en las anteriores fuentes se manejarán datos del mercado o históricos de empresas similares.

- Durante el estudio puede variar la cantidad de aires acondicionados ya sea porque se incluyan nuevos equipos o porque se den de baja por mala operación, por lo tanto, en los resultados finales podrán aparecer equipos que ya fueron cambiados por la empresa.

1.8 Productos del Proyecto

Tabla de variables de activos de expansión directa actualmente operativos en la Universidad del Norte

Políticas de reemplazo y mantenimiento de equipos de aire acondicionado de expansión directa.

Plan de renovación y mantenimiento de equipos de aire acondicionado de expansión directa teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Costo operativo
- Valor de Salvamento
- Tiempo de operación
- Vida útil
- Otras variables definidas por el mercado que incidan en el cambio de equipos

2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se hace mención al marco conceptual y marco teórico, el primero con el fin de contar con los conceptos que se mencionan a lo largo del documento y que pueden ser consultados para claridad de un tema específico, por otra parte, el marco teórico donde se consigna los conceptos base que son utilizados para el desarrollo principal del proyecto.

2.1 Marco Conceptual

Activo: Es un elemento que posee valor potencial o real para una organización. El valor puede variar entre diferentes organizaciones y sus partes interesadas y puede ser tangible o intangible, financiero o no financiero.

Aire acondicionado: Sistema que permite variar la temperatura y humedad de una zona definida utilizado para confort utilizando la transferencia de calor entre dos o más sustancias como principio de funcionamiento.

Aires acondicionados agua fría: Sistema de aire acondicionado en el que el intercambio de calor se da de forma indirecta entre el aire y el refrigerante utilizando como fluido intermedio agua.

Aires acondicionados expansión directa: Sistema de aire acondicionado en el que el intercambio de calor se da de forma directa entre el aire y el refrigerante.

Aires acondicionados ventana: Sistema de aire acondicionado que utiliza el principio de expansión directa y que se instala en paredes simulando una ventana. Es de los modelos más económicos en el mercado.

Aires acondicionados VRF: Tipo de aire acondicionado que utiliza flujo de refrigerante variable y que permite el uso de una unidad externa común para varias unidades internas.

Capex: Inversiones que una empresa realiza en bienes de equipo y que provoca beneficios para una organización, ya sea por medio de la compra de nuevos activos fijos o por medio de un incremento en el valor de los activos fijos ya existentes

Ciclo de vida: En referencia a los activos de una organización se entiende como las etapas por las cuales pasa un activo desde su concepción hasta su disposición final. anteproyecto, proyecto, diseño, compra o manufactura, instalación, prueba, puesta en marcha, operación y mantenimiento, hasta su eventual reciclaje, descarte o disposición final.

Depreciación: Mecanismo mediante el cual se reconoce contable y financieramente el desgaste y pérdida de valor que sufre un bien o un activo por el uso que se haga de el con el paso del tiempo.

Desincruste: Descontaminación y limpieza del serpentín de un intercambiador de calor mediante el uso de productos químicos.

Eficiencia Energética: Optimización del uso de la energía a través de mejora en tecnología. Para algunos equipos se utiliza como indicador calculado como los resultados obtenidos dividido entre los recursos necesarios para lograr una labor o función.

Falla: Condición indeseada que impide que un equipo o máquina, desempeñe la función para lo cual existe.

Gestión de activos: Disciplina que gestiona el ciclo de vida de un activo con el fin de maximizar su valor.

Índices de precios al consumidor: Mide la evolución del costo promedio de una canasta de bienes y servicios representativa del consumo final de los hogares, expresado en relación con un período base. El dato del IPC, en Colombia, lo calcula mensualmente el Departamento Administrativo Nacional de Estadística

Mantenimiento preventivo: Intervención que se realiza a un activo o infraestructura para su conservación de tal forma que se evite la falla.

Mantenimiento Correctivo: Intervención que se realiza a un activo o infraestructura con el fin de corregir defectos o fallas presentados.

Opex: Costo continuo en el que incurre una empresa para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema.

Plan: Modelo sistemático que se elabora antes de realizar una acción, con objetivo de dirigirla y encauzarla

Política: Decisiones administrativas aprobadas en una empresa con el fin de ser guía en su operación, ejecución de programas, estrategias o proyectos.

Programación dinámica: Método para reducir el tiempo de ejecución de un algoritmo mediante la utilización de sub-problemas superpuestos (es decir que un mismo sub-problema es usado para resolver diferentes problemas mayores) y subestructuras óptimas.

Refrigerante: Sustancia utilizado industrialmente para lograr cambios de temperatura en un proceso u objeto.

Refrigerante fluorocarbonado: Refrigerantes químicos elaborados con carbono y flúor. Estos refrigerantes evolucionaron pasando de tener como compuesto el cloro a eliminarlo y así proteger la capa de ozono.

Software de mantenimiento: Programa diseñado para facilitar la gestión del mantenimiento utilizando la planeación y control de actividades.

Seguridad y salud en el trabajo: Área de la empresa que se encarga de la prevención de lesiones y enfermedades con el trabajo.

Tonelada de refrigeración (TR): Unidad de medida para cuantificar la capacidad refrigerante de un equipo.

2.2 Marco Teórico

Como base para definir el momento óptimo en que un equipo debe ser cambiado o desechado se hace necesario conocer desde la teoría los conceptos asociados al ciclo de vida del activo y los factores que permiten esta toma de decisión. De esta forma se pretende utilizar herramientas metodológicas como la optimización y más específicamente la programación dinámica para poder tener en cuenta las variables asociadas en el proceso de toma de decisiones de manera efectiva.

2.2.1 Mantenimiento

Debido a que este proyecto nace de una necesidad a partir del concepto de mantenimiento, se hace necesario conocer su origen, la razón por la cual se aborda dicho concepto, la importancia de este, y su desarrollo y actualidad.

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones realizadas sobre un bien o equipo, de manera que se garantice su operatividad en un tiempo estimado (Real Academia Española, 2018).

Se debe entender que desde el momento en el que se adquiere un bien o un equipo, e inicia su operación, van a empezar a ocurrir ciertos cambios irreversibles en él, los cuales afectarán directamente su funcionamiento; una simple limpieza con una estopa de un bien o equipo puede reducir el impacto de dichas condiciones o cambios, por lo cual, podemos afirmar que esta acción, es mantenimiento.

El contexto histórico del mantenimiento se remonta a los años previos a la segunda guerra mundial. Las industrias se vieron inmersas en un problema, debido a que los técnicos u operadores de máquinas, debían, además de manipular las máquinas para procesos productivos, realizar la reparación de las mismas al momento de ocurrir una falla. Para afrontar esta problemática, las grandes industrias se vieron en la necesidad de crear un departamento o unidad dentro de sus procesos, que se encargará del mantenimiento de sus máquinas y/o equipos.

A través del tiempo, este concepto ha sido estudiado, y desarrollado, con el fin de minimizar los tiempos improductivos en una operación, al igual que los efectos generados por un fallo inesperado.

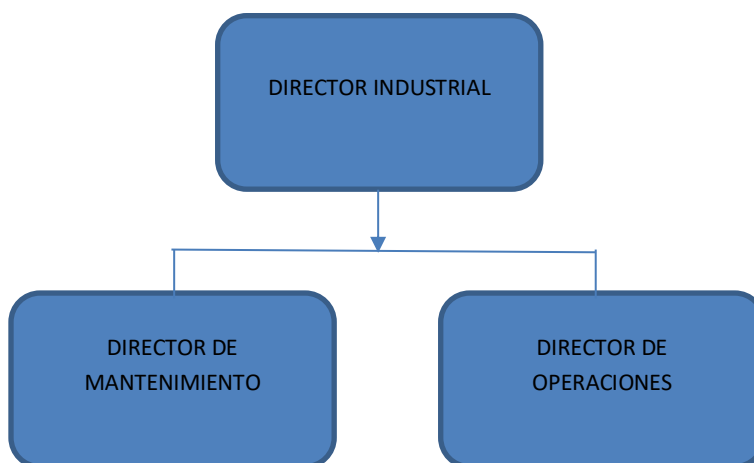


Figura 10. Modelo organizacional de Henry Ford Reformado

- **Importancia del mantenimiento**

Para las empresas hoy en día, la búsqueda de la excelencia, demanda grandes esfuerzos e inversiones, a nivel de procesos, políticas, procedimientos, ya que la calidad es integral, y abarca todos los aspectos que hacen parte de la estandarización de las empresas de calidad. Es decir, que toda empresa que quiera optar a una certificación de calidad ISO9001 debe implementar el mantenimiento, como herramienta fundamental para postularse a dicha certificación. Por otra parte, si se mira desde el punto de vista operativo, se evidencia la fluidez y armonía en los procesos productivos; y si se mira desde el punto de vista financiero, existirá mayor productividad, lo cual deriva en aprovechamiento de los recursos, y por tal motivo mayores márgenes de contribución en los ingresos.

Para examinar la importancia del mantenimiento en los procesos modernos es imprescindible asociar sus objetivos. Tal y como lo menciona Molina (2006), el mantenimiento resulta de gran importancia porque permite:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, las fallas sobre los bienes.
- Disminuir la gravedad de las fallas que no se lleguen a evitar.
- Evitar detenciones inútiles o paradas de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Balancear el costo de mantenimiento con el correspondiente al lucro cesante.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.

Hoy en día, podemos encontrar que el mantenimiento se ha clasificado en diferentes acciones, definidas según lo requiera cada bien o equipo; y ha evolucionado a través de los años de la siguiente manera (Monchy y Fraxanet, 1990):

Generación 1- Hasta 1945

- Reparar averías
- Mantenimiento correctivo

Generación 2 - 1945 - 1980

- Relación entre probabilidad de fallo y edad
- Mantenimiento preventivo programado
- Sistemas de planificación

Generación 3 - 1980 - 1990

- Mantenimiento preventivo condicional
- Análisis causa - efecto
- Participación de producción

Generación 4 – 1990 en adelante

- Proceso de mantenimiento
- Calidad total
- Compromiso de todos los departamentos
- Mantenimiento basado en el riesgo

Es así como se empieza abordar los conceptos de mantenimiento preventivo, y correctivo.

- **Mantenimiento correctivo.**

Este tipo de mantenimiento es originado por un fallo inesperado que genera acciones inmediatas para su corrección en el menor tiempo posible. De su criticidad depende la intensidad de las acciones inmediatas. El mantenimiento correctivo se debe evitar en todo momento, debido a su alto impacto negativo en cuanto a operatividad, y temas presupuestales. Por ejemplo, si un equipo como un aire acondicionado de oficina presenta una falla, dependiendo de cuán crítico sea dicho fallo, se puede encontrar los siguientes escenarios:

- *Escenario 1. Fallo no solucionable a corto plazo* – El usuario final manifiesta su incomodidad por ausencia de confort. Esta situación se agrava por la espera de repuestos importados.
- *Escenario 2. Fallo solucionable a corto plazo, pero realizando una inversión importante* Se deben realizar compras o servicios no planeados con un consecuente costo mayor al estándar. El servicio de reparación o instalación de repuestos será más costoso debido a la premura de la solicitud. No se puede realizar una buena selección del personal idóneo, ni de las condiciones comerciales más acertadas.
- *Escenario 3. Fallo sin solución, y reemplazo el bien o equipo* – Gasto no presupuestado; demoras por desinstalación e instalación de equipo nuevo; incomodidad en el usuario final por actividades de reemplazo del equipo en su espacio de trabajo.

Por lo anterior, este es un tipo de mantenimiento que, por su condición de inevitable, requiere de la implementación de planes de acción que lo mitiguen. No obstante, el mantenimiento correctivo tiene aplicaciones y ventajas de acuerdo con la finalidad, y la metodología que se aplique a cada caso. Por ejemplo, cuando se quiere aprovechar el máximo tiempo de vida útil de un equipo si registrar paradas. Sin embargo, para el caso planteado en este proyecto, no aplican este tipo de ventajas.

- **Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo, consiste en la aplicación de acciones programadas en los bienes o equipos, de manera que se reduzca la aparición de una falla inesperada. Dichas acciones, son el producto de un estudio de fallas, generalmente realizado por los fabricantes, que aportan a la continuidad operativa y mitigación de riesgo o incertidumbre financiera (gastos no presupuestados) que se puedan presentar producto de dichas fallas. Así como el mantenimiento correctivo tiene sus ventajas, aplicaciones y desventajas, el mantenimiento preventivo también puede ser beneficioso, inaplicable o no tenido en cuenta en los procesos. Dentro de las ventajas de este mantenimiento se tiene:

- Reducción del impacto, respecto a tiempo operativo, generado por una falla, y por consiguiente una parada inesperada
- Es aplicable a un alto porcentaje de equipos, ya que, según los análisis realizados por los fabricantes, y la experiencia de los operadores recolectada en años, indica que la probabilidad de fallas de un equipo depende, o está relacionada con la ausencia de este mantenimiento, lo cual impacta en la vida útil del mismo

A su vez, las desventajas más significativas, tienen que ver con el tiempo necesario para la ejecución de este tipo de mantenimiento, por lo cual, no se aprovecha el máximo tiempo operativo de un equipo entre dos fallos.

2.2.2 Gestión de activos

La búsqueda de la eficiencia en las inversiones de capital ha significado un cambio en la industria en donde las áreas de operación y mantenimiento dan importancia no solo a

los gastos en la época productiva de los activos sino en todo su ciclo de vida. Cada vez son más comunes en las áreas financieras de las empresas términos como costo de ciclo de vida del activo (LCC), costos de parada (CP), gestión de activos, etc.

Estos cambios han generado que a nivel internacional se creen normas para orientar a las empresas en las mejores prácticas en la gestión de activos, optimizándolos y disminuyendo tanto el riesgo como el costo para el capital invertido en ellos. La norma PAS 55 se centra en activos físicos y ha sido reemplazada internacionalmente por la Norma 55001 que considera activos organizativos, financieros, físicos, etc. Estas normas son las que actualmente están siendo consideradas por los empresarios.

De acuerdo con el informe de Diagnóstico del Mantenimiento en Colombia (Asociación Colombiana de Ingenieros., 2018), más del 60% de las empresas no han implementado un sistema para el aseguramiento de la gestión de activos. Lo anterior se puede ver en la Figura 11 en el que las empresas que utilizan ISO 55000 y Pas 55 solo llegan al 37.06%.

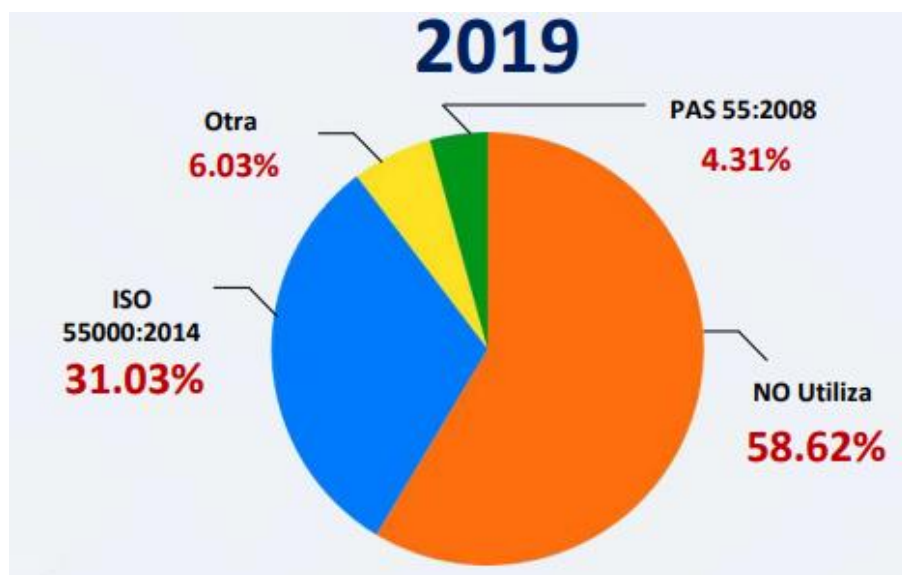


Figura 11. Sistemas de gestión de activos utilizados en la empresa colombiana.

Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros, 2018

La gestión de activos evalúa todo el ciclo de vida del activo desde la identificación de la necesidad hasta su disposición final, si bien se ha avanzado mucho en las etapas de diseño e implementación con todo lo relacionado a proyectos y como se muestra en el diagnóstico realizado por la Asociación Colombiana de Ingenieros, (Aciem), Figura 12, en el que se evidencia una mejora en la implementación en los sistemas para el mantenimiento también se debe resaltar que es muy poco lo que se trata la etapa en que pasa de la operación y mantenimiento del equipo al disponer o reemplazar.

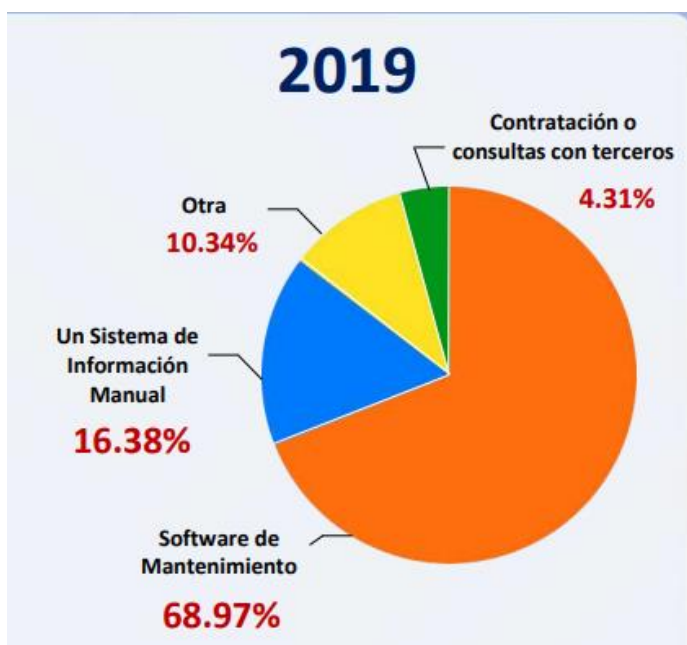


Figura 12. Uso de herramientas informáticas para soportar y asegurar la gestión del mantenimiento.

Fuente: [Asociación Colombiana de Ingenieros, 2018](#)



Figura 13. Ciclo de vida del activo.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el mismo diagnóstico “en las empresas más grandes se observa que en el rango de maquinaria mayor a 25 años hay una tendencia a la baja que pasa de 22.4% a 18.5%” (Asociación Colombiana de Ingenieros., 2018), mostrando que las empresas están realizando renovación de equipos. La recomendación entregada por esta asociación a las empresas es “mantener la tendencia de anticiparse en la renovación de los activos de las empresas y no esperar a que el activo llegue al final de su ciclo de vida y deba ser cambiado por ineficiente” (Asociación Colombiana de Ingenieros., 2018, p. 38).

Para esta etapa, la norma 55001:2014 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2015), en su numeral 9.0, hace énfasis en la evaluación de desempeño de los activos en el que define:

La organización debe determinar:

- A) Lo que se necesita monitorear y medir.
- B) Los métodos de seguimiento, medición y evaluación, según sea aplicable, para asegurar la validez de los resultados.
- C) El momento en el que se debe realizar el seguimiento y la medición.
- D) El momento en el que se deben analizar y evaluar los resultados del seguimiento y medición.

La organización debe evaluar e informar sobre:

- El desempeño de los activos.
- El desempeño de la gestión de los activos, incluyendo el desempeño contable y extracontable.
- La eficacia del sistema de gestión de activos.

Estos puntos pueden ser tenidos en cuenta por las empresas para generar las políticas de cambio de sus equipos permitiendo una planificación adecuada, asegurando la eficiencia en el manejo de los recursos financieros, y disminuyendo los riesgos de paradas.

Woodhouse (2014), quien en su proyecto SALVO aborda el tema basado en riesgos, plantea los siguientes cuestionamientos: “¿Cuánto puedo extender la vida por una

modificación o renovación?”, “¿En qué medida? ¿Merece la pena el seguimiento o mantenimiento?”. Las respuestas a estas preguntas usualmente son resueltas con suposiciones muy inciertas dando soluciones complejas ante los comportamientos no cíclicos en la vida útil del activo. Es por esto que la forma más atractiva para su determinación es teniendo en cuenta costos y riesgos (Woodhouse, 2014). Otra consideración realizada por Woodhouse es no solo tener en cuenta el actual equipo sino los cambios a implementar con el nuevo activo en los que la reconfiguración de la infraestructura, instalación y otros elementos pueden hacer diferente la decisión.

Además del riesgo y costo existen otros factores que finalmente están relacionados con el desempeño del equipo y por lo tanto con sus fallas y mantenimiento. La falla, en casi todas las partes de la operación, es una función del tiempo. En diferentes etapas de la vida útil la probabilidad de que algo falle es distinta. La curva que describe la probabilidad de falla se llama “curva en forma de tina” o “curva de la bañera” mostrada en la Figura 14. En esta se puede apreciar un nivel de falla alto en el inicio de la vida útil correspondiente a los ajustes de arranque y acople de la máquina, posteriormente una zona en donde opera con una baja tasa de fallas y finalmente su aumento. Es allí donde se afecta el servicio prestado por el equipo y se debe evaluar si es conveniente el mantenimiento, *overhaul* o cambio del equipo.



Figura 14. Curva de la bañera.

Fuente: Monchy (1990)

Finalmente tenemos, como lo manifiesta el Institute of Asset Management (2015) en cuanto a las decisiones de inversión de capital, la necesidad del análisis del costo del ciclo de vida del activo el cual se basa en la comprensión del deterioro de los activos, las inversiones (Capex), costos de mantenimiento (Opex) y los riesgos asociados al proceso y negocio. Como se muestra en la Figura 15 en la medida que pasa el tiempo el riesgo se incrementa mientras que el desempeño del equipo disminuye a unos costos más elevados de operación y mantenimiento.

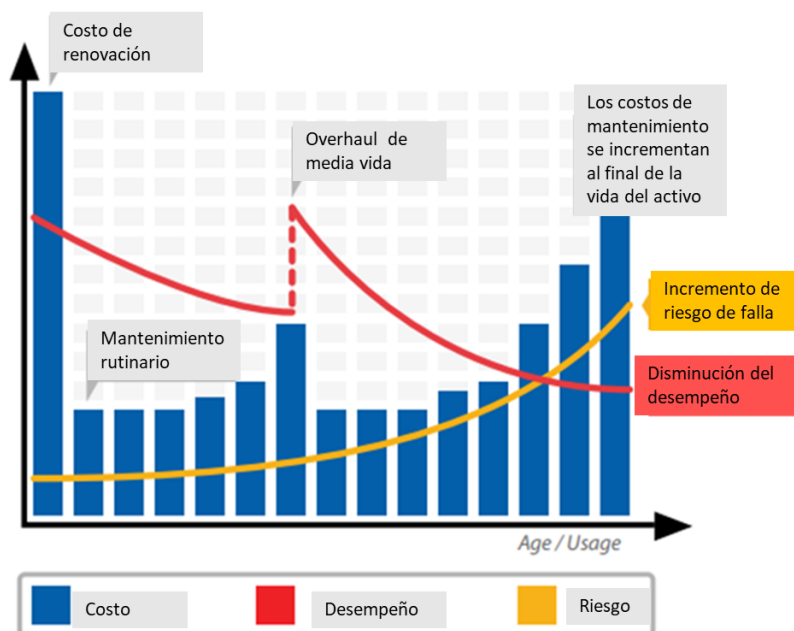


Figura 15. Ejemplo de decisión tomada con base en costo, condición y riesgo de un equipo.

Fuente: Institute of Asset Management, 2015.

2.2.3 Reemplazo de equipos

El análisis de ciclo de vida de un equipo implica la revisión de variables económicas y técnicas que permitan la toma de decisión de reemplazo en el mejor momento de tal forma que se optimice el recurso. La maquinaria con el tiempo se vuelve ineficiente por el desgaste de sus partes y también generan gastos no presupuestados en mantenimientos correctivos inesperados.

La demora en el reemplazo de equipos hace que el bien pase de ser beneficio para la empresa a convertirse en un gasto al afectar otros procesos o por la misma inversión que se debe hacer para mantenerlo en operación.

El equipo de mantenimiento de una empresa tiene tres opciones de decisión cuando un equipo llega a su vida útil:

1. Reemplazar el equipo debido al deterioro. El equipo debe ser desechado o vendido.
2. Realizar *overhaul* o mantenimiento mayor al equipo teniendo en cuenta su estado.

Esta decisión implica un costo mayor al mantenimiento rutinario del equipo

3. Seguir trabajando con el equipo sin acatar la opción dos ya sea por la falta de recursos o porque la máquina se encuentra en excelente condición para que funcione con los mantenimientos rutinarios.

En la toma de decisión se puede perder inversión al reemplazar el equipo antes de haber alcanzado la recuperación máxima o por el contrario generar costos excesivos al mantenerla en un punto de ineficiencia en la operación.

Dentro de las metodologías utilizadas por las empresas para definir el punto de reemplazo de sus equipos se pueden encontrar varias siendo algunas más económicas mientras que otras mucho más técnicas. Algunas de estas opciones son:

- Costos medios anuales: Tiene en cuenta los costos fijos, variables y por depreciación de cada máquina generando un valor total anual y un valor medio anual. En el punto en que el valor medio anual sea menor este será el año en que a futuro se deberían cambiar los equipos. Como limitante comenta Cantillo en su artículo: Reemplazo económico de los equipos (Cantillo, 2011) es que para este modelo se asume que las condiciones de producción son las mismas en todos los periodos analizados.

- Método multicriterio IIR: El método consiste en dar puntaje a variables previamente definidas por expertos de tal manera que se realice una función matemática en el que se ponderen características consideradas como críticas para la toma de decisión. Castro (2011) en su trabajo: Una aplicación multicriterio para la decisión de reemplazar un equipo explica que el indicador resultante debe ser analizado posteriormente y aceptado por los expertos para hacer correcciones sobre el mismo.
- Vida útil óptima: Se plantea el periodo que representa la vida útil óptima de un equipo nuevo, donde se minimiza el valor presente neto de sus costos de manutención. El equipo se cambia cuando sus costos de operación y mantenimiento superan el VPN calculado. Este método fue planteado por Churchman en 1971.
- Modelos de optimización: buscan encontrar un valor óptimo para una función predeterminada ya sea el mínimo para funciones de costos o gastos asociados con la utilización del equipo, o el máximo para funciones de rentabilidad o utilidad esperada por la operación del equipo. Este tipo de soluciones han evolucionado en el tiempo como se muestra en el trabajo Aproximación al reemplazo de equipo industrial (Folleco, 2004). Estos modelos presentan una ventaja fundamental dado que permiten tomar decisiones con base en las potencialidades, eficiencias y resultados económicos del equipo actual.
- Modelos de límite, estos plantean encontrar el instante de tiempo donde se alcanza un parámetro previamente establecido como el modelo de costos acumulado de mantenimiento.

Folleco (2004) concluye sobre los diferentes modelos “que los modelos existentes plantean la decisión de reemplazo en términos de variables netamente económicas, ya sea porque no se reconoce la importancia de la inclusión de otro tipo de variables, por la imposibilidad de establecer escalas comparativas entre ellas o por que se terminan expresando en términos económicos que aumentan la incertidumbre del modelo y por ende de la decisión final”

Por último, se tienen modelos basados en probabilidades que pretenden pronosticar el estado futuro y, por lo tanto, generar criterios para el reemplazo de equipos. Un ejemplo de esto es la confiabilidad de equipos que sugieren un periodo probable de falla de acuerdo con históricos y análisis detallado de los componentes de cada equipo. Al igual que las herramientas de simulación pueden terminar siendo métodos muy efectivos pero costosos al momento de implementar.

2.2.4 Optimización y programación dinámica

La optimización como herramienta para modelar decisiones que tienen un efecto en decisiones siguientes dentro de un sistema (Hillier & Lieberman, 1996), nos puede dar opciones que lleven a definir si se mantiene o cambia un equipo. Como lo manifiesta Hillier, el modelo a elaborar es un proceso predictivo de comportamiento del sistema en donde las decisiones deben apoyar un objetivo global el cual finalmente es para nuestro caso obtener el mayor beneficio para el negocio (Hillier & Lieberman, 1996).

Para este caso en particular, en el que se busca analizar esta toma de decisiones, se utilizará el modelo de programación dinámica el cual es un método para reducir el tiempo de ejecución de un algoritmo mediante la utilización de sub-problemas superpuestos (es decir que un mismo sub-problema es usado para resolver diferentes problemas mayores) y subestructuras óptimas.

De acuerdo a Malisani (1989) la diferencia entre los problemas de programación lineal y los problemas que se pueden solucionar por programación dinámica es la variable tiempo. En el caso de la programación lineal se busca una solución en un momento específico mientras que con programación dinámica el resultado puede ser analizado desde puntos de tiempo diferentes.

Algunas de las aplicaciones de programación dinámica son:

- Estudio de flujo de redes
- Distribución de fondo de capital
- Control de inventarios
- Programación de reparación de equipos
- Determinación de reemplazo de equipos
- Problemas de inversión de capital

Una subestructura óptima significa que se pueden usar soluciones óptimas de subproblemas para encontrar la solución óptima del problema en su conjunto.

Una mala implementación puede acabar desperdiciando tiempo recalculando las soluciones óptimas a subproblemas que ya han sido resueltos anteriormente, esto se puede evitar guardando las soluciones que ya hemos calculado. Por lo tanto, si se necesita resolver el mismo problema más tarde, se podrá obtener la solución de la lista de soluciones calculadas y reutilizarla.

El procedimiento general de resolución de estas situaciones se divide en el análisis recursivo de cada una de las etapas del problema, en orden inverso, es decir, comenzando por la última y pasando en cada iteración a la etapa antecesora. El análisis de la primera etapa finaliza con la obtención del óptimo del problema. La solución de problemas mediante esta técnica se basa en el llamado Principio Óptimo enunciado por Bellman:

- Dado un estado, la política óptima para las siguientes etapas no depende de la política tomada en las etapas anteriores.
- La decisión óptima inmediata sólo depende del estado en el que se está, no de cómo se llegó hasta él.
- Toda la información sobre el pasado se resume en el estado en que se encuentra. Una vez conocida la solución óptima global, cualquier solución parcial que involucre sólo una parte de las etapas es también una solución óptima.
- Todo subconjunto de una solución óptima es a su vez una solución óptima para un problema parcial.

Para la solución de problemas con programación dinámica se necesita “cierto grado de ingenio y un buen conocimiento de la estructura general de los problemas de Programación

Dinámica para reconocer cuándo y cómo se puede resolver un problema por medio de estos procedimientos” como lo manifiesta Cruz Moreno en su disertación sobre técnicas de programación dinámica y su implementación en hojas de Cálculo (Cruz Moreno, 2017). Las características de los problemas de programación dinámica son los siguientes:

1. El problema se puede dividir en etapas que requieren una política de decisión en cada una de ellas.
2. Cada etapa tiene un cierto número de estados asociados a ella. En general, los estados son las diversas condiciones posibles en las que el sistema podría estar en esa etapa del problema.
3. El efecto de la política de decisión en cada etapa es transformar el estado actual en un estado asociado con la etapa.
4. El procedimiento de solución está diseñado para encontrar una política óptima para el problema completo, a partir de un procedimiento que inicia analizando una etapa y que en cada uno de los pasos agrega una nueva, hasta abarcar el problema en su totalidad.
5. Dado el estado actual, una política óptima para las etapas restantes es independiente de la política adoptada en las etapas anteriores (Principio de Optimalidad). Para los problemas de Programación Dinámica en general, el conocimiento del estado actual del sistema comunica toda la información acerca de su comportamiento anterior, necesaria para determinar la política óptima de ahí en adelante.
6. El procedimiento de solución empieza por hallar la política óptima para cada estado de la última etapa.

7. El procedimiento de solución emplea una relación recursiva que identifica la política óptima para la etapa t , dada la política óptima para la etapa $t - 1$.

2.3 Análisis del Marco de Referencia

En el desarrollo de la gestión de activos es importante tener en cuenta todas sus etapas con el fin que el costo total de su vida sea óptimo dando a la empresa el mayor rendimiento de su inversión. La pregunta en su etapa de operación de reemplazar o mantener se hace crucial pudiendo significar ahorros importantes en el tiempo o por el contrario gasto innecesario ante la demora del cambio.

Una de las metodologías existentes es la utilización de programación dinámica en que a través de la definición de subproblemas, alternativas y estados se puede lograr una respuesta a esta pregunta logrando beneficios para la empresa.

Dentro de estas alternativas podemos concluir que deben estar enfocadas en tres puntos de vista, los cuales afectan el negocio, Costos, riesgos y desempeño como lo muestra la Figura 16.

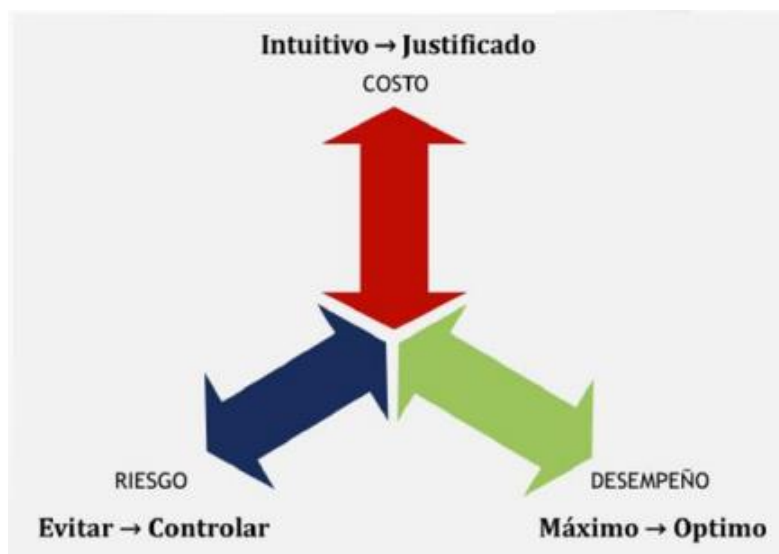


Figura 16. Alternativas para la toma de decisiones de mantener o disponer de un equipo.

Fuente: Woodhouse (2014)

El primero estará relacionado con costos de mantenimiento, operación y otros en que se debe incurrir en los nuevos equipos a instalar. Por otra parte, el desempeño del activo tendrá que tenerse en cuenta y compararse con la vida útil propuesta para el activo a cambiar y sus opciones de alcanzarla con las políticas de mantenimiento y operación de la empresa. Por último, los riesgos que implican las fallas de los activos en el negocio tanto a nivel financiero como a nivel de imagen, seguridad y otros aspectos.

Por otra parte, se cuenta con normas internacionales que guían a los empresarios en la estructura de lo que es relevante para esta toma de decisiones, lo cual debe ser tenido en cuenta para que las empresas establezcan políticas y procedimientos que faciliten a su equipo humano el control y análisis de sus activos.

3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

La programación dinámica exige de una metodología básica para poder dar solución a los problemas que se desean resolver, en este caso inicialmente se van a definir las variables y parámetros a utilizar para luego proceder con la caracterización de los mismos en el marco de la operación de la Universidad del Norte, posteriormente se aplicarán los conceptos y así poder obtener una solución final que será analizada para definir la toma de decisiones de reemplazo de equipos de aire acondicionado de expansión directa.

3.1 Definición de parámetros que inciden en la decisión

En la toma de decisiones con respecto a la definición del momento en que debemos disponer o reemplazar un activo se tienen parámetros muy importantes a analizar y dependerá de cada institución las seleccionadas para los análisis. Definir las variables de costo, riesgo y desempeño (Ver Figura 14) es un buen inicio para poder conocer los factores que van a incidir en la toma de decisión para un tipo de equipo en específico.

3.1.1 Parámetros de Riesgo.

Usualmente las empresas cuentan con una matriz de riesgo en el que están definidos sus riesgos basados en la probabilidad – impacto/consecuencia. Esta práctica es muy utilizada en las áreas de Seguridad y Salud en el Trabajo, pero también puede ser llevada al ámbito

financiero de la empresa, mantenimiento o cualquier departamento que desee utilizar esta metodología para la toma de decisiones.

Algunos de los riesgos que se evalúan mediante esta matriz son

- Riesgo Legal: Probabilidad de pérdidas debido al incumplimiento de la legislación.
- Riesgo en salud y seguridad industrial: Probabilidad de enfermedad o lesión de personas debido a la exposición a las condiciones del proceso.
- Riesgo en seguridad física: probabilidad de pérdidas o daños en personas e infraestructura por acciones realizadas por personas o la naturaleza.
- Riesgo ambiental: Probabilidad de daño en medio ambiente por acción humana o natural.
- Riesgo operacional: Probabilidad de pérdidas debido a errores humanos, por procesos internos, tecnológicos o acontecimientos externos de los sistemas.
- Riesgo financiero: Probabilidad de ocurrencia de un evento con consecuencias financieras negativas para la organización.

Al tratarse de un proyecto bajo el enfoque de la operación de equipos de aire acondicionado de expansión directa solo se tomará el riesgo operacional a evaluar, definiendo el nivel de riesgo según el proceso al que atiende cada equipo. El riesgo estará concentrado en la consecuencia en caso de daño de los aires acondicionados y el impacto que esto puede generar a nivel de los procesos propios de la Universidad. Las principales consecuencias e impacto que se puede generar por el daño de aires acondicionados son afectaciones de imagen, de procesos misionales, continuidad del negocio.

3.1.2 Parámetros de desempeño – Condiciones de operación.

Los parámetros de desempeño o condiciones de operación son medidas para conocer si los equipos están siendo productivos comparados con su diseño. Algunos de ellos son eficiencia energética, unidades producidas, desperdicio del proceso, entre otros.

En este punto se incluyen las condiciones de operación como factor importante para lograr un buen desempeño del equipo y que inciden directamente en su productividad. La tecnología utilizada, la ubicación geográfica del equipo del equipo, personal que opera el equipo y otros factores son ejemplo de la incidencia que pueden tener en su necesidad de disposición y reemplazo

Para la selección de estos parámetros se tuvo en cuenta la Tabla 6 con el fin de ver cuales aplicaban a los equipos de aire de expansión directa.

Tabla 6. Parámetros de desempeño

Parámetros de desempeño	Definición	Observación
Desempeño energético	Mediciones realizadas relacionadas con el consumo energético	No se cuenta con la información de variables como EER y COP de los equipos por lo que no puede ser tomada en cuenta en el estudio
Tecnología utilizada	Nivel de desarrollo de un equipo en cuanto a conocimientos del fabricante o características en su producción	Se cuenta con diferentes tecnologías y refrigerantes en los equipos del campus. Esta variable es importante a tener en cuenta de forma cualitativa debido a la necesidad de reemplazo de algunos equipos por el refrigerante utilizado
Capacitación personal operativo	Nivel de conocimiento del personal que opera un equipo	Los equipos de la Universidad cuentan con sistemas de encendido programado por lo que no incide en el estudio
Edad del equipo	Tiempo transcurrido entre la fabricación, compra o puesta en operación de un equipo y la fecha de medición	Se cuenta con la información de edad del equipo por lo que se define con una variable del estudio
Vida útil	Tiempo que estima el fabricante de un equipo en que este operara en condiciones normales de producción	Se cuenta con la información de políticas de vida útil de equipo por lo que se define con una variable del estudio
Ubicación	Lugar geográfico en que se encuentra un equipo	Se cuenta con la información de las ubicaciones sin embargo no está relacionada con la vida útil u otra variable de desempeño por lo que las conclusiones de esta serían cualitativas y no correspondientes a la programación dinámica propuesta
Horas de uso / día	Tiempo de operación de un equipo en un día de trabajo	Se cuenta con la información de edad del equipo por lo que se define con una variable del estudio

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los parámetros de desempeño o condición de operación que se tendrán en cuenta son: Tecnología utilizada – refrigerante, edad del equipo, vida útil y horas de uso.

El desempeño energético de cada equipo no se tendrá en cuenta dado que no se tiene

información precisa que permita incluirlo en el modelo, en cuanto a la capacitación del personal se asume como alta teniendo en cuenta que la Universidad cuenta con contratistas especialistas para la operación y mantenimiento de sus equipos y, por último, la tecnología será revisada a nivel cualitativo por influir de forma positiva o negativa según refrigerantes utilizados que impactan el medio ambiente.

3.1.3 Parámetros de Costo.

Los costos son la variable más visible para la alta gerencia de una empresa en cuanto a la necesidad de cambio de equipos. Valores de adquisición de nuevos equipos, seguros, depreciación, gastos de operación tanto preventivos como correctivos son usualmente analizados para esta toma de decisiones

La Universidad del Norte cuenta con sistemas de control de mantenimiento y activos en el que se pueden obtener como variables de costo: Valor mantenimiento preventivo, valor mantenimiento correctivo. El costo de operación es la suma de estos dos valores y el valor que corresponde a contar con el equipo encendido que se da por el consumo energético. Para este trabajo el consumo energético no será tenido en cuenta como parte del costo de operación al no contar con este valor y asumiendo que es el mismo entre un equipo nuevo y uno de similar característica con mayores años de operación siendo solo una variable diferenciadora cuando se da cambio de tecnología. Para el caso de este proyecto las variables de costo son conocidas dado que se maneja con el histórico por lo tanto pasan de ser variables a parámetros a utilizar en la programación dinámica.

El valor de salvamento es aquel que tiene el activo al final de su vida útil ya sea a nivel contable a través de la depreciación o producto de la venta, despiece, etc. Para el caso en particular, puede ser tomado del valor en libros se puede obtener del sistema financiero de la Universidad o manejar el valor obtenido por parte de sección de servicios generales en la venta de equipos la cual es la encargada del reciclaje de equipos a través de un centro de acopio. Para este proyecto se realizará una combinación teniendo en cuenta que existe una depreciación acelerada en donde en el primer año el equipo pierde el 50% de su valor y continúa depreciándose linealmente hasta obtener el valor de salvamento por venta al final de su vida útil.

Finalmente, la Tabla 7 muestra un resumen de los parámetros de costo consideradas en el modelo planteado en esta investigación

Tabla 7. Parámetros de Costo

Variables de costo	Definición	Observación
Valor mantenimiento preventivo	Valor pagado dentro del contrato de mantenimiento que incluye insumos, mano de obra de acciones preventivas a equipos	Recursos financieros invertidos con el fin de prevenir la falla en los equipos
Valor de mantenimiento correctivo	Valor pagado por concepto de repuestos necesarios para mantener en operación un equipo después de una falla	Recursos financieros invertidos con el fin de solucionar una falla que afecta el proceso o equipo
Valor de salvamento	Valor recuperado por la venta de un equipo en operación, este puede ser asumido según su venta proyectada o según la depreciación que se estime.	Recurso financiero que se puede recuperar por la disposición del equipo, este puede tomarse según depreciación o venta real del equipo
Valor a nuevo	Costo de un equipo nuevo de similares o iguales características	Costo del equipo en estado nuevo
Costo de operación	Costo que implica el funcionamiento de un activo	Valor necesario para la operación del equipo. Para este modelo se tendrá como el costo preventivo sumado a los correctivos del equipo por cada año de operación

Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización de las variables o parámetros de decisión

En la caracterización de las variables o parámetros de decisión se busca considerar las relacionadas de riesgo, desempeño y costos definidas en el capítulo anterior aplicadas a la Universidad del Norte y más específicamente a los equipos de aire acondicionado expansión

directa. Se definirán las características, forma de obtener los datos y sus análisis para cada una de las variables

3.2.1 Parámetros de Riesgo.

El impacto/consecuencia de un fallo de aire acondicionado está relacionado con la imagen de la Universidad, continuidad del negocio, su operación y el número de personas que se afectan por el evento. La criticidad a manejar será analizada según la Tabla 8, siendo el número 1 el de mayor severidad y el número 3 el menos crítico.

Tabla 8. Caracterización del parámetro Impacto / Consecuencia

Impacto/ Consecuencia	Ubicación de equipos	Razón
1	Cuartos técnicos - Continuidad del negocio	Riesgo de daño de equipo, afectación de imagen institucional
2	Zonas académicas (Salas de usuarios - Salones de clase)	Número de personas afectadas - Proceso misional de Universidad
3	Oficinas administrativas , académicas , áreas comunes	Operación común de Universidad

Fuente: Elaboración propia

La valoración de impacto más alta tiene que ver con aquellos cuartos de máquina o áreas de la Universidad que requieren un alto nivel de confiabilidad y disponibilidad por tratarse de equipos que soportan la infraestructura física del campus o zonas que en caso de presentarse una falla podría afectar la imagen de la Universidad de forma crítica ante medios de comunicación, entes de control, entre otros.

Finalmente, se obtiene una distribución de impacto consecuencia como se muestra en la Figura 17 en donde la cantidad de equipos con impacto – consecuencia más alta es 54 equipos mientras que el mayor número de equipos se ubica en la categoría 3 de este mismo gráfico

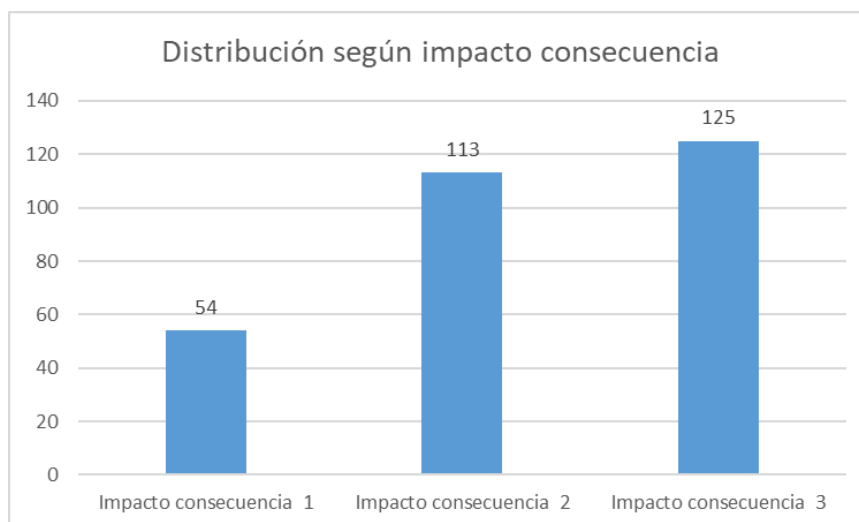


Figura 17. Distribución según impacto consecuencia.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Parámetros de desempeño.

A continuación, se realiza una descripción del estado de los equipos estudiados en la investigación a la luz de los parámetros de desempeño seleccionadas: tecnología, edad del equipo, horas de operación y vida útil.

Tecnología: Se cuenta con varias tecnologías dentro de los equipos seleccionados, como aires de ventana, equipos con refrigerante variable, Fancoils, entre otros, sin embargo, lo más relevante es el uso del refrigerante para cada equipo. Si bien es un parámetro cualitativo y difícil de llevar a la programación dinámica, sí es pertinente para el plan de renovación. Los equipos con refrigerante R-22 deberán ser reemplazados en el corto plazo

debido a razones ecológicas de uso de refrigerantes fluorocarbonados. Actualmente se cuenta con 69 equipos que cumplen esta condición como se muestra en la Figura 18.

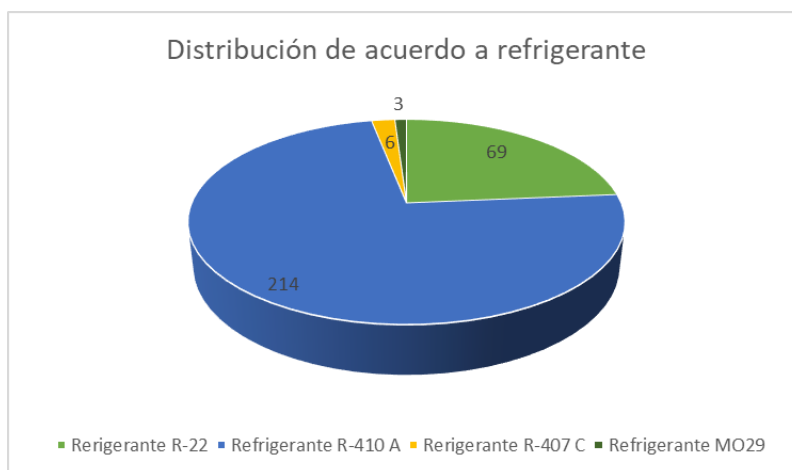


Figura 18. Distribución de equipos de acuerdo con refrigerante utilizado.

Fuente: Elaboración propia

Edad del equipo: Esta variable se obtiene del sistema financiero de la Universidad (Banner) en donde se registra la fecha de compra de cada equipo. La distribución por años está dada según la Figura 19.

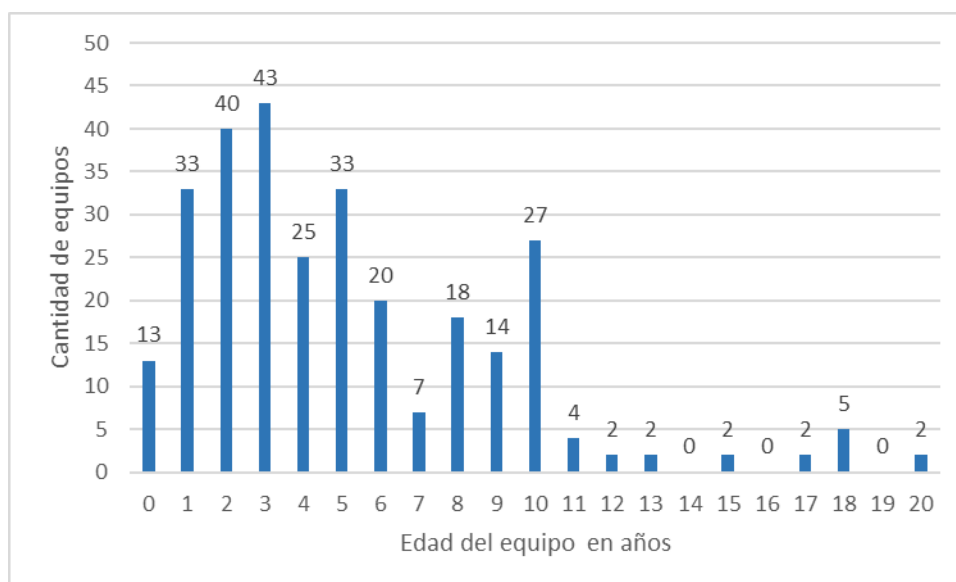


Figura 19. Distribución según edad del equipo.

Fuente: Elaboración propia.

Horas de operación: Un factor importante en el desempeño y duración de los equipos está dado por su frecuencia de uso. Para los equipos de aire acondicionado de la Universidad se ha definido dos tipos de operación, la primera corresponde a operación continua en donde los aires acondicionados funcionan 24 horas al día y son utilizados para acondicionamiento de áreas críticas en laboratorios, cuartos de máquinas, bodegas de alimentos, entre otros. Por otra parte, se tienen los equipos que funcionan para otros usos como salones, oficinas etc. en el que varía entre 12 y 18 horas de uso diario, a estos se les denomina uso estándar. En la Figura 20 se puede evidenciar la distribución de equipos según esta variable en la que 54 equipos cumplen con operación continua 24 horas continuas mientras que 238 tienen operación estándar entre 12 y 18 horas diarias.



Figura 20. Distribución según horas de uso.

Fuente: Elaboración propia.

Vida útil: La vida útil usualmente es informada por el fabricante bajo unas condiciones estándares de operación sin embargo la Universidad dentro de su política de activos asigna en el sistema financiero (Banner) un valor de vida útil según la experiencia e histórico de cambio de cada tipo de equipos. Para los aires acondicionados de expansión directa, la vida útil está definida según la variable horas de operación diaria: 4 años para aquellos que operan 24 horas diarias y 7 años para aquellos que son de operación estándar (entre 12 y 18 horas diarias). La distribución es igual a la Figura 18 en donde se muestra que 238 equipos cuentan con operación estándar y tienen vida útil de 7 años mientras que los restantes 54 equipos corresponden a operación 24 horas con vida útil de 4 años.

En este punto es importante analizar que 83 equipos ya cuentan con vida útil cumplida según los criterios actuales manejados por la Universidad lo que equivale a decir que el 28,4% del total de los equipos ya debieron haberse reemplazado. (Ver Figura 21).

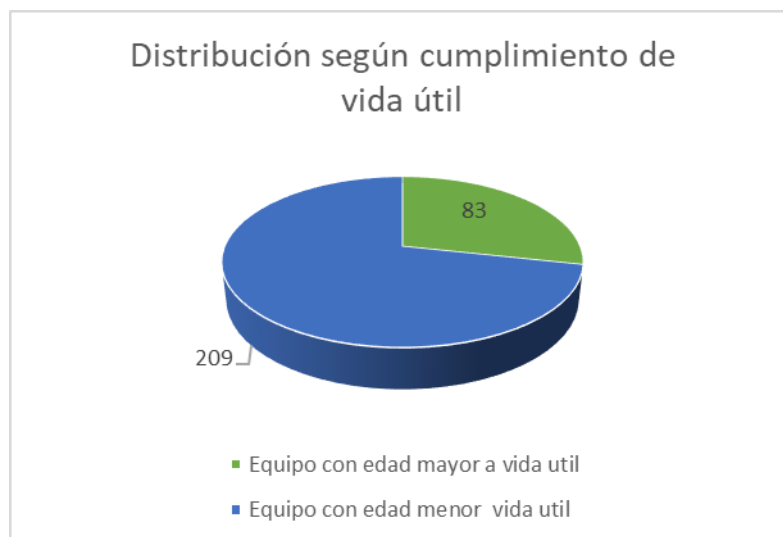


Figura 21. Distribución según vida útil.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Parámetros de Costo.

La Universidad cuenta con diferentes plataformas tecnológicas en donde se pueden obtener los históricos de los costos que han afectado a un equipo, a continuación, se explica en que consiste cada uno de estos parámetros:

- Valor de mantenimiento preventivo: La Universidad cuenta con un servicio de mantenimiento preventivo para los equipos de aire acondicionado en el que se paga de acuerdo la capacidad medida en las toneladas de refrigeración de cada equipo. Este valor incluye los materiales y mano de obra para la ejecución a través de una rutina mensual de mantenimiento en la que se encuentran definidas las actividades en una lista de chequeo que debe ser entregada por el contratista al final del periodo. De igual forma están incluidos los diagnósticos en caso de

una falla del equipo y la mano de obra de reparación en caso de requerir el cambio de un repuesto. La aplicación de programación dinámica para este caso no tiene en cuenta los costos administrativos por parte de la Universidad para efectos de seguimiento y control del contratista, sino que se enfoca principalmente en el valor operativo de los aires acondicionados.

- Valor de mantenimiento correctivo: El mantenimiento correctivo es ejecutado por el mismo contratista al que se le tiene asignado el contrato anual y en este valor se incluyen los repuestos que se necesiten para los equipos en su operación normal. Los valores son predefinidos por una lista de repuestos válida para el año y que se facturan después de confirmada la falla y el cambio del repuesto por el personal de mantenimiento de la Universidad.
- Valor de salvamento: En el caso de aires acondicionados su disposición actual se da por daño total del equipo, cambio de tecnología o decisión por vida útil del equipo, es decir que en la mayoría de los casos el valor en libros es cero, por lo tanto, se tomará como valor de salvamento el valor recuperado de la venta del equipo posterior a su desmonte y un valor asumido como aprovechamiento de partes del equipo desmontado que pueden ser usados en trabajos correctivos. En la Tabla 9 se muestra el resumen de valores por salvamento de acuerdo con toneladas de refrigeración.

Tabla 9. Resumen de valores por salvamento de acuerdo con toneladas de refrigeración por cada equipo.

Toneladas de refrigeración	Valor por reciclaje (\$)	Valor por aprovechamiento repuestos (termostato-motores- filtros) (\$)	Total
1-2,5	50.000	25.000	75.000
3-4,5	100.000	25.000	125.000
5-10,0	250.000	150.000	400.000
11-25,0	400.000	250.000	650.000

Fuente: Elaboración propia

- Valor a nuevo: El valor a nuevo es el valor comercial de un equipo en el que se incluye la compra, montaje y puesta en operación del equipo. Para este caso, se realizó la revisión de los últimos aires adquiridos de estas capacidades y revisión del mercado en el que se llega a los valores mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10. Valor a nuevo para los equipos según toneladas de refrigeración

Toneladas de refrigeración (Tr)	Valor comercial (\$)
0,75	\$ 2.350.000
1	\$ 2.716.500
1,5	\$ 2.855.000
2	\$ 2.950.000
2,5	\$ 3.550.000
3	\$ 4.459.000
4	\$ 7.065.000
5	\$ 9.852.500
6	\$ 10.100.000
7,5	\$ 12.096.266
8	\$ 12.096.266
10	\$ 14.209.393
15	\$ 23.059.000
20	\$ 60.107.581
25	\$ 75.468.749

Fuente: Elaboración propia.

Para el uso de este valor en la aplicación de programación dinámica se tiene en cuenta el índice de precios al consumidor de cada año, de tal forma que se tiene en cuenta el valor a nuevo en la etapa específica en que se encuentre el análisis.

3.2.4 Análisis descriptivo de los parámetros

Se cuenta con datos que permiten utilizar el modelo de programación dinámica basado en redes para poder definir políticas y planes de mejora. En la distribución por edades de los equipos mostrado la Figura 19, se puede ver que las edades actuales se concentran en los 10 primeros años. Los equipos mayores son los que aportan más información para obtener detalles sobre los mantenimientos preventivos y correctivos, pero a nivel de plan de renovación ya deberían haberse cambiado por el cumplimiento de su vida útil.

De igual forma, se encuentran equipos que por la tecnología utilizada requieren una evaluación de su cambio independientemente de su fecha de adquisición. El uso de refrigerantes amigables con el medio ambiente se convierte en un criterio cualitativo suficiente para proponer la renovación. De los 292 equipos de la base de datos para esta investigación 104 equipos ya deberían haber sido cambiados por los criterios anteriormente mencionados.

Con los parámetros caracterizados podemos obtener el listado de datos a usar en el modelo y cuáles de estos parámetros pueden servir para segmentar los equipos y facilitar la determinación de políticas y el plan de renovación. En atención a lo anterior, los parámetros

de impacto/ consecuencia para la organización y horas de uso entendiéndolo como operación estándar o 24 horas serán utilizadas para segmentación de los resultados que permiten la definición de políticas, lo anterior teniendo en cuenta que estos parámetros no son incluidos en el desarrollo del modelo

El parámetro de edad del equipo será tenido en cuenta como elemento del modelo al definir las etapas en que este se compone siendo el valor de siete años el límite de acuerdo con lo establecido actualmente por la Universidad.

Como conclusión del análisis de datos se propone solucionar el modelo en toda su vida útil haciendo uso de los costos de los equipos con mayor inversión

3.3 Aplicación del modelo.

Para la aplicación del modelo se deben dejar definidos los supuestos, la definición de parámetros y sus elementos principales. Posteriormente a la presentación del modelo, se desarrollará la aplicación, a manera de ejemplo, a un equipo específico. Finalmente se expondrá la aplicación a todos los equipos priorizados de la población de aires acondicionados.

3.3.1 Supuestos del modelo

- El problema de reemplazo de una máquina abarca n años

- Al inicio de cada año, una máquina se mantiene en servicio un año más o es reemplazada por una nueva.
- Los mantenimientos preventivos se programan al inicio del periodo t .
- Los mantenimientos correctivos y los daños ocurren al inicio del periodo t .

3.3.2 Parámetros, elementos del modelo y función

La metodología exige la definición de parámetros y elementos para su solución. Para el caso de los parámetros se tendrán: el costo a nuevo (N), el costo de operación (C), el valor de salvamento (S) y los años de la máquina (t). En cuanto a los elementos, se deben definir las etapas (i) que en este caso serán dados en años de edad del equipo, las alternativas siendo Reemplazar (R) y Mantener (M).

Parámetros o inputs:

$t = 1, 2, 3 \dots$ Número de años de uso de la máquina k .

$N(t)$ Costo por inversión en una nueva máquina k con edad t

$C(t)$ Costo de operación anual para la máquina k con edad t .

$S(t)$ Valor de salvamento para la máquina k con edad t .

$i = 1, 2, 3 \dots$ Periodo de análisis (años)

k : máquina de 1 tonelada de refrigeración de funcionamiento estándar

Elementos:

- Etapas: Las etapas serán los años a analizar en el modelo y representado por la letra i
- Alternativas: Las alternativas en la etapa del año i son:
REEMPLAZAR (R)
MANTENER (M)
- El estado en la etapa i es la de edad de la máquina al inicio del año i

Función

Teniendo en cuenta que las máquinas no producen un ingreso cuantificable y que lo que se busca es minimizar el costo del equipo se establece una función mínima a saber:

Función: $f(t) = \text{Costo del equipo mínimo en los años } i, i+1, \dots, n$

$f(t)$ min:

$$f_n(t) = \min \left\{ \begin{array}{ll} C(t) - S(t+1) & \text{si se MANTIENE} \\ C(0) - S(t) - S(1) + N & \text{si se REEMPLAZA} \end{array} \right\}$$

$$f_i(t) = \min \left\{ \begin{array}{ll} C(t) + f_{i+1}(t+1) & \text{si se MANTIENE} \\ C(0) - S(t) + N + f_{i+1}(1) & \text{si se REEMPLAZA} \end{array} \right\}, i=1,2,3,, n-1$$

La ecuación $f_n(t) = \min$ se utiliza para el caso del último año de operación del equipo en el que posterior a este se venden recuperando el valor de salvamento según la edad del mismo. Para las demás etapas se establece la función $f_i(t) = \min$ en el que se tienen en cuenta

el valor acumulado de las etapas posteriores a la del análisis. Una de las grandes ventajas de la programación dinámica es poder separar en subproblemas el caso de estudio de tal forma que se pueda analizar y revisar en cada año de operación según la evolución de sus costos y cualquier factor que pueda afectar los parámetros como el valor a nuevo o el salvamento.

Para el caso de estudio se aprovecha que se cuentan con datos de costos de años anteriores por lo que se utilizarán con el fin de conocer si la decisión de haber mantenido los equipos durante su vida útil es correcta y así poder tomar decisiones a futuro.

Con el fin de ilustrar la metodología se procede a dar solución al problema a través de programación dinámica utilizando los datos de un equipo de una tonelada de refrigeración de operación estándar.

Los datos para los equipos de 1 tonelada de refrigeración con operación estándar son:

Tabla 11. Datos para equipo de una tonelada

Año	Tiempo (años)	Costo de operacion $C(t)$, (\$)	Salvamento, $S(t)$ (\$)	Costo de máquina nueva $N(t)$
2012	0	\$ 141.914		\$ 2.135.235
2013	1	\$ 141.914	\$ 1.358.250	\$ 2.187.335
2014	2	\$ 141.914	\$ 1.144.375	\$ 2.229.769
2015	3	\$ 197.435	\$ 930.500	\$ 2.311.379
2016	4	\$ 210.801	\$ 716.625	\$ 2.467.859
2017	5	\$ 222.925	\$ 502.750	\$ 2.609.761
2018	6	\$ 232.036	\$ 288.875	\$ 2.716.500

3.3.3 Solución del modelo

Teniendo definidas las variables, elementos y función se procede a resolver el modelo para lo cual se establece la red a analizar. En este caso, la red irá desde el año 0 hasta el año 7 de operación teniendo en cuenta los parámetros actuales definidos por la Universidad en cuanto a vida útil de los equipos y los datos con que se cuenta a nivel de mantenimientos preventivos y correctivos que definen la función costo. La red cuenta con 6 etapas teniendo en cuenta que en el año 0 está nuevo y en el año 7 cuenta con vida útil cumplida por lo tanto se debe disponer el equipo (Ver Figura 22).

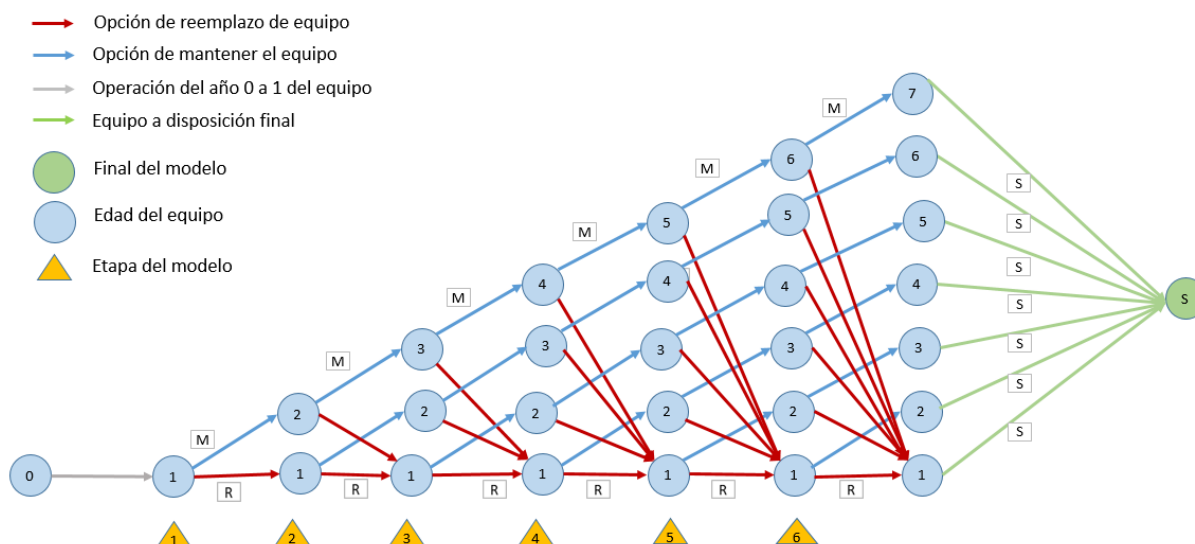


Figura 22. Red del modelo propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

Para resolver la red se puede apreciar que para cada estado se cuentan con las opciones de Mantener (M) o reemplazar (R), solo hasta el último año de análisis se tiene solo la opción

de reemplazar aplicando el salvamento o recursos que se pueden recuperar de la venta del equipo.

El análisis del modelo implica realizar la revisión de cada etapa en orden de la mayor a la menor Iniciando por el subproblema 1 el cual se muestra en la Figura 23 correspondiente al año o etapa 7 del análisis. En este punto la única decisión posible es el de vender dado que esta edad se dio como límite para el problema

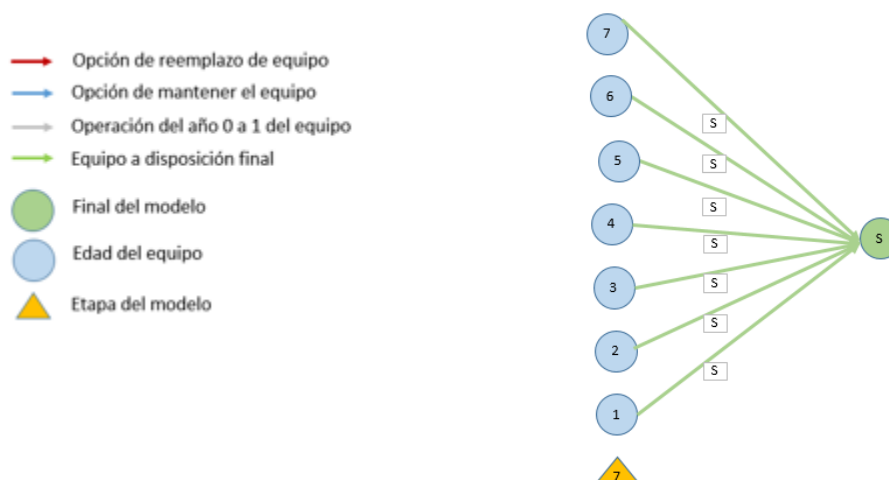


Figura 23. Subproblema 1, etapa 7.

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a esto se analiza el año o etapa 6 mostrada en la Figura 24 correspondiente al subproblema 2 en el que se aplica la función $fn(t)$ min. Se puede ver que las flechas azules muestran la opción de mantener para cada estado de equipo y las rojas la opción de reemplazar. De esta forma si se tiene un equipo de 6 años se cuenta con la opción de mantener llegando a un equipo de 7 años o al tomar la opción de reemplazar pasar a un equipo de un

año de uso en la siguiente etapa. Esto aplica para cada estado contando con las opciones de mantener o reemplazar

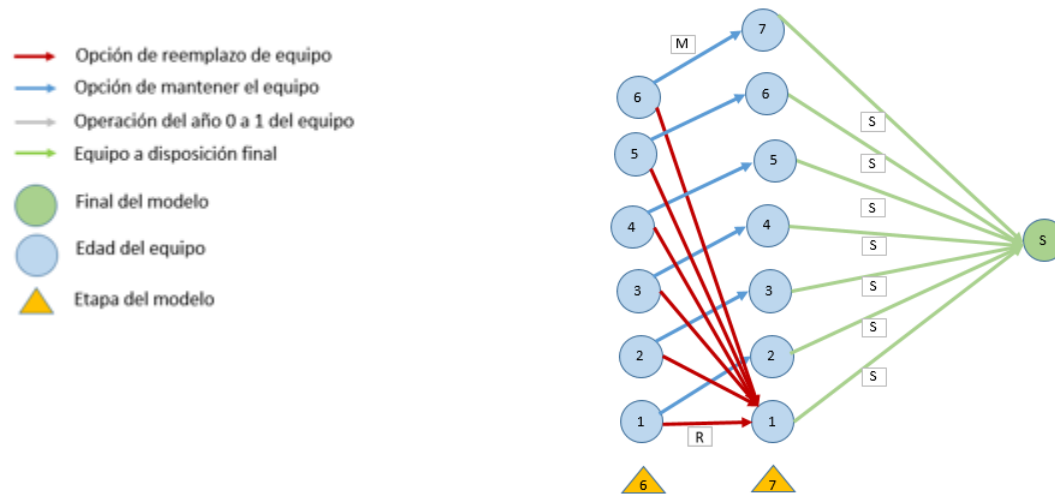


Figura 24. Subproblema 2, etapa 6.

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar la función $fn(t)$ se obtiene la Tabla 12 en el que se encuentran los resultados dependiendo de la decisión de mantener o reemplazar y mostrando en la columna Decisión la función mínima de estas dos opciones. Con esto se obtiene la decisión parcial de esta etapa sin embargo no se pueden sacar conclusiones al no contar con la solución de todas las etapas

$$fn(t) = \min \left\{ \begin{array}{ll} C(t) - S(t+1) & \text{si se MANTIENE} \\ C(0) - S(t) - S(1) + N & \text{si se REEMPLAZA} \end{array} \right\}$$

Tabla 12. Solución para la etapa 6

ETAPA 6						
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión		
	$C(t) - S(t+1)$	$C(0) - S(t) - S(1) + N(t)$				
1	-\$ 1.002.461	-\$ 387.251	-\$ 1.002.461	MANTENER		
2	-\$ 788.586	-\$ 130.942	-\$ 788.586	MANTENER		
3	-\$ 519.190	\$ 164.543	-\$ 519.190	MANTENER		
4	-\$ 291.949	\$ 534.898	-\$ 291.949	MANTENER		
5	-\$ 65.950	\$ 890.675	-\$ 65.950	MANTENER		
6	\$ 157.036	\$ 1.211.289	\$ 157.036	MANTENER		

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma y utilizando la ecuación para $f_i(t)$ se obtienen los valores para las demás

etapas

$$f_i(t) = \min \begin{cases} C(t) + f_{i+1}(t+1) & \text{si se MANTIENE} \\ C(0) - S(t) + N + f_{i+1}(1) & \text{si se REEMPLAZA} \end{cases}, i=1,2,3,, n-1$$

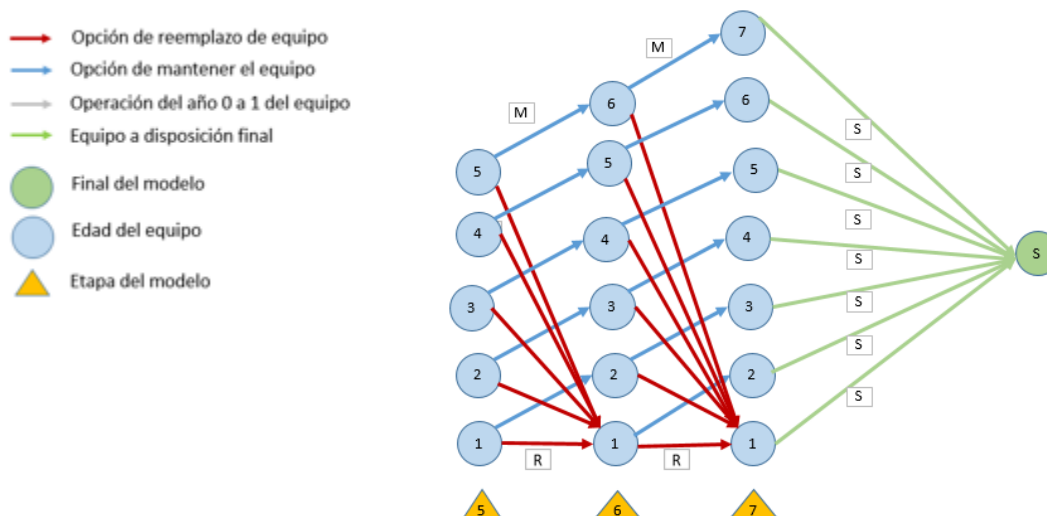


Figura 25. Subproblema 3, etapa 5.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Solución para la etapa 5

ETAPA 5						
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor		Decisión	
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$				
1	-\$ 646.671	\$ 583.748	-\$ 646.671		MANTENER	
2	-\$ 377.275	\$ 840.058	-\$ 377.275		MANTENER	
3	-\$ 94.513	\$ 1.135.542	-\$ 94.513		MANTENER	
4	\$ 144.851	\$ 1.505.897	\$ 144.851		MANTENER	
5	\$ 379.961	\$ 1.861.674	\$ 379.961		MANTENER	

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la etapa 5 la decisión continúa siendo mantener en todas las edades de equipos

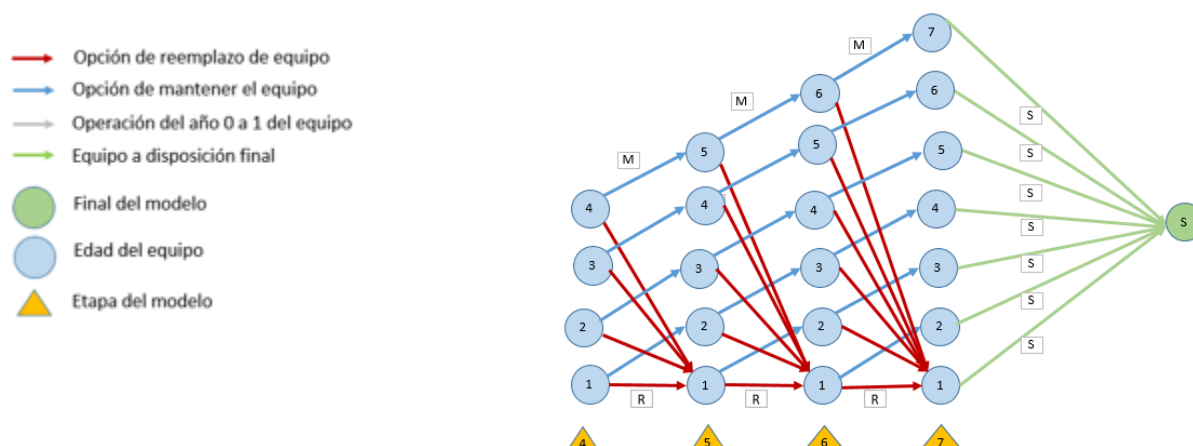


Figura 26. Subproblema 4, etapa 4.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14 Solución para la etapa 4

ETAPA 4						
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor		Decisión	
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$				
1	-\$ 235.361	\$ 1.554.747	-\$	235.361	MANTENER	
2	\$ 47.401	\$ 1.811.057	\$	47.401	MANTENER	
3	\$ 342.287	\$ 2.106.541	\$	342.287	MANTENER	
4	\$ 590.762	\$ 2.476.897	\$	590.762	MANTENER	

Fuente: Elaboración propia.

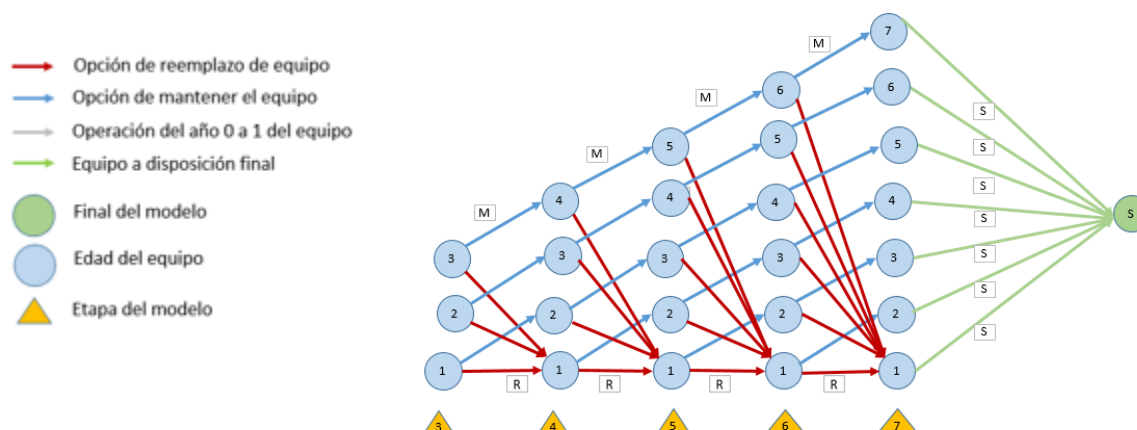


Figura 27. Subproblema 5, etapa 3.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15 Solución para la etapa 3.

ETAPA 3						
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor		Decisión	
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$				
1	\$ 189.315	\$ 2.525.747	\$	189.315	MANTENER	
2	\$ 484.201	\$ 2.782.056	\$	484.201	MANTENER	
3	\$ 788.197	\$ 3.077.540	\$	788.197	MANTENER	

Fuente: Elaboración propia.

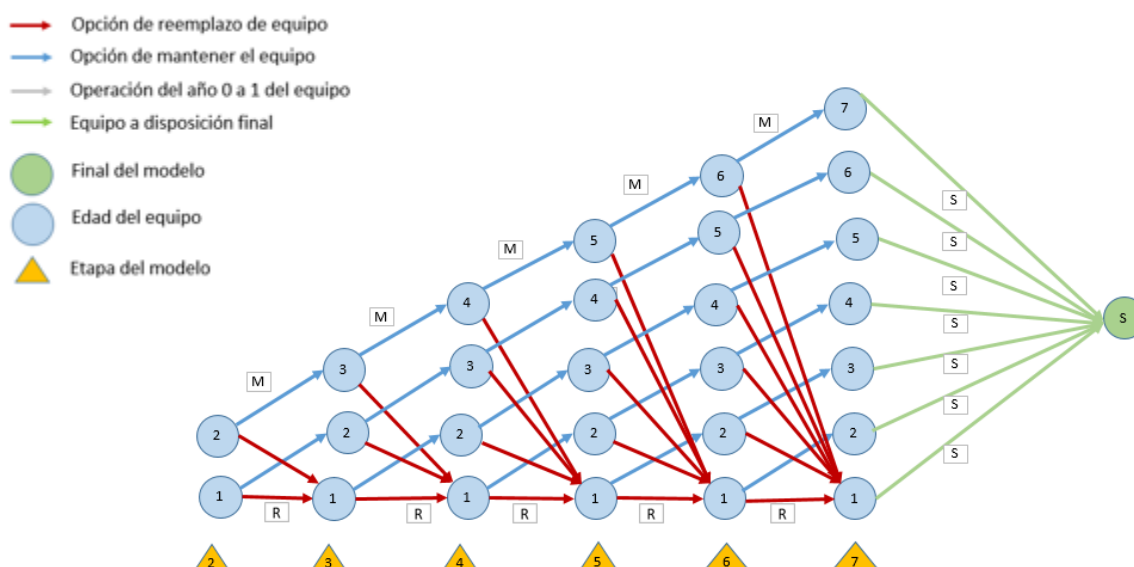


Figura 28. Subproblema 6, etapa 2.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Solución para la etapa 2

ETAPA 2					
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión	
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$			
1	\$ 342.287	\$ 3.496.746	\$ 342.287	MANTENER	
2	\$ 646.283	\$ 3.753.055	\$ 646.283	MANTENER	

Fuente: Elaboración propia.

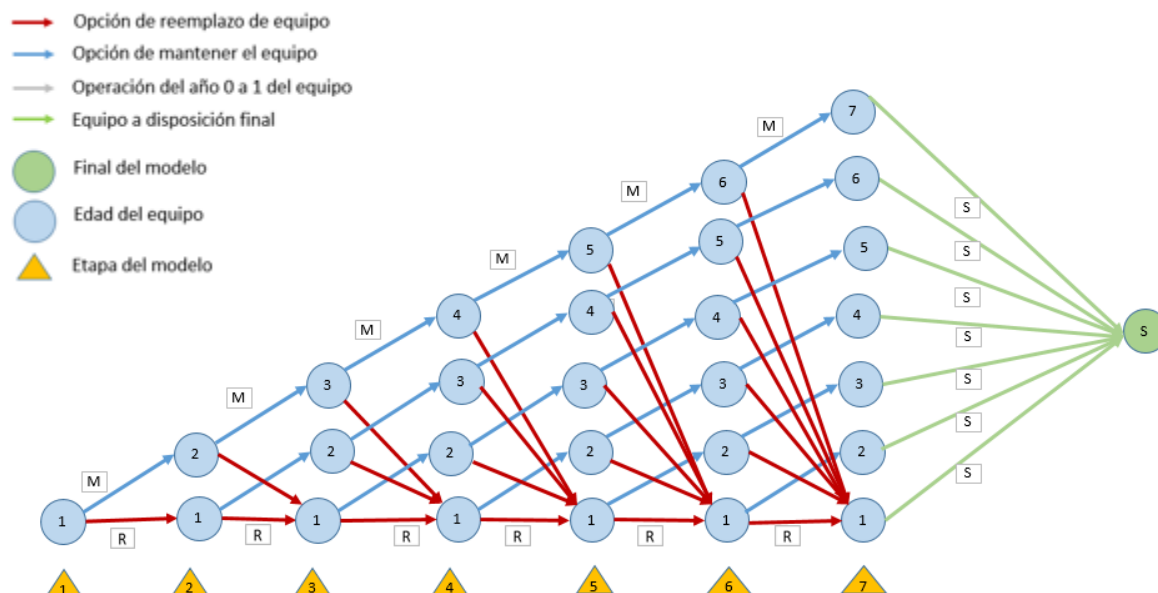


Figura 29. Subproblema 7, etapa 1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Solución para la etapa 1.

ETAPA 1				
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	
1	\$ 788.197	\$ 4.467.745	\$ 788.197	MANTENER

Fuente: Elaboración propia

Después de haber analizado las etapas se revisa del inicio al final de acuerdo con la decisión de cada etapa, es decir que en el ejercicio planteado en el año 1 el resultado fue mantener por lo que en el año 2 se debe revisar la decisión para un equipo de dos años el cual también resulto mantener, para el año 3 tendría una máquina de tres años dando como decisión mantener, si sucesivamente hasta el horizonte del ejemplo.

El resultado final genera como secuencia de ciclo de vida que la máquina se debería seguir manteniendo hasta el final definido por disposición.

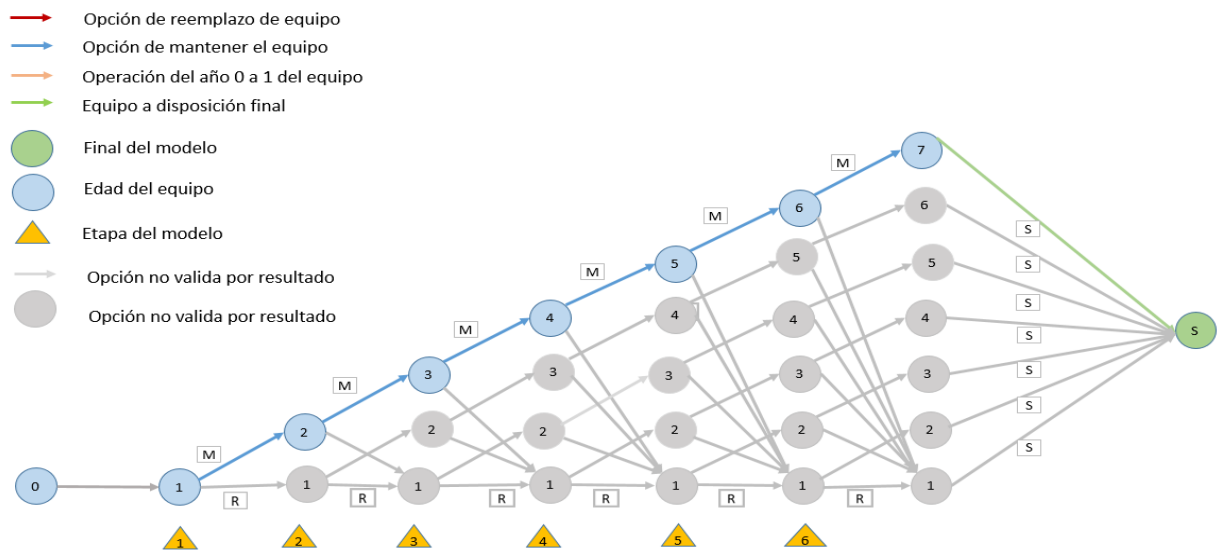


Figura 30. Resultado de modelo para equipos de 1 Tr con operación estándar.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Resultado final para un equipo de 1 tonelada de refrigeración con operación estándar.

Etapa		Resultado
t1		MANTENER
t2		MANTENER
t3		MANTENER
t4		MANTENER
t5		MANTENER
t6		MANTENER
t7		MANTENER

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Resultados del modelo

Utilizando la misma metodología del punto anterior se aplicó programación dinámica a las diferentes capacidades de equipos de acuerdo con su operación obteniendo resultados de mantener en el ciclo de vida útil definido de 7 años como se puede ver en la Tabla 19, 20 y 21.

Tabla 19. Resultados para equipos de operación 24 horas

Capacidad (Tr) Operación	1 24 H	1,5 24 H	2 24 H	7,5 24 H
Etapas	Resultado	Resultado	Resultado	Resultado
t1	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t2	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t3	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t4	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resultados para equipos de operación Estándar 1-5 Toneladas de refrigeración.

Fuente: Elaboración propia

Capacidad (Tr) Operación	1 STD	1,5 STD	2 STD	3 STD	4 STD	5 STD
Etapas	Resultado					
t1	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t2	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t3	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t4	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t5	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t6	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t7	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Resultados para equipos de operación Estándar 6-25 Toneladas de refrigeración

Capacidad (Tr) Operación	6 STD	7,5 STD	8 STD	10 STD	15 STD	20 STD	25 STD
Etapa							
t1	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t2	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t3	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t4	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t5	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t6	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
t7	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER

Fuente: elaboración propia

3.3.5 Otros escenarios de aplicación de Programación dinámica

Teniendo en cuenta los resultados de solo mantener y no reemplazar los equipos en su vida útil se propuso revisar otros escenarios en los que permitan evaluar casos puntuales, entre ellas se tiene:

Fallos de alto costo: Teniendo en cuenta que una de las prácticas actuales es desechar el equipo cuando sucede un fallo de alto costo en el que el valor real supere el valor de reparación se propone aplicar programación dinámica a uno de estos casos con el fin de evaluar si la decisión tomada puede ser validada con esta metodología. Utilizando el mismo procedimiento con los datos mostrados a continuación se realiza el análisis para dos equipos, el primero en el que se revisa el caso de un daño de compresor de un equipo de xx toneladas de refrigeración y el segundo para un caso de cambio de serpentín. Los valores de cada una de estas piezas superan el 50% del valor del equipo a nuevo.

En el primer caso se cambia un serpentín de valor \$16'000.000 en 4 año a un equipo de 15 toneladas dando como resultados los mostrados en la tabla 22 y la gráfica 31 en el que se decide como solución óptima el reemplazo del equipo en la etapa 3. Es importante aclarar

que en caso de que la vida útil fuera mayor el patrón de cambio fuera repetitivo con cambio cada tres años sin embargo pro tratarse de un límite de 7 años la programación dinámica realizada en el segundo ciclo permite mantener el equipo en lugar del cambio en el año 6.

Tabla 22. Solución para equipo con falla de alto costo. Ejemplo 1

Etapas	Edad del equipo	Decisión
Etapas 1	1	MANTENER
Etapas 2	2	MANTENER
Etapas 3	3	REEMPLAZAR
Etapas 4	1	MANTENER
Etapas 5	2	MANTENER
Etapas 6	3	MANTENER

Fuente: Elaboración propia.

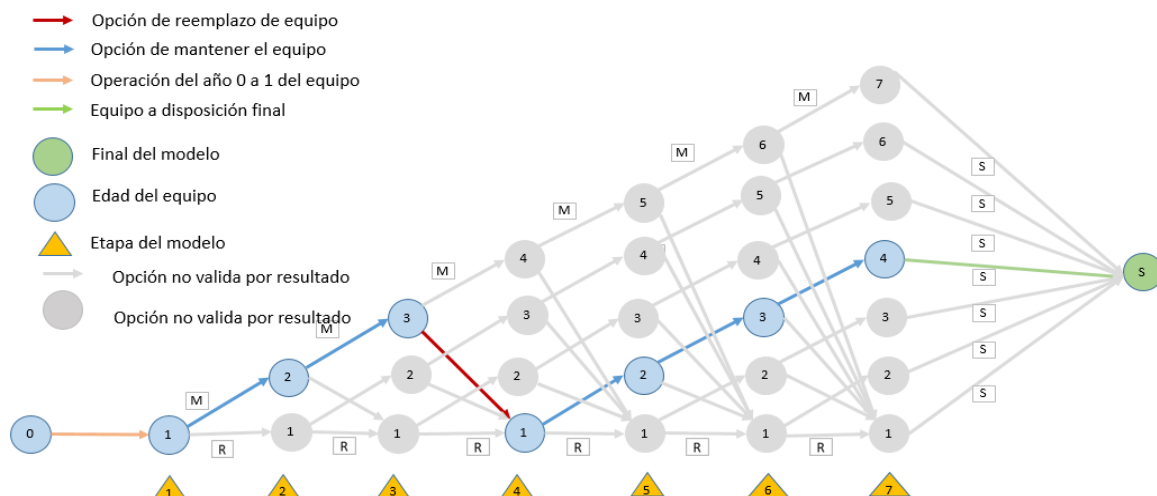


Figura 31 Solución para equipo con falla de alto costo . Ejemplo 1.

Fuente: Elaboración propia

En el segundo caso se realiza la misma metodología para un daño de compresor en el año 5 de un equipo de 7.5 toneladas encontrando como resultado una toma de decisión de cambio del equipo en el año 5 en el que sucede la falla.

Tabla 23. Solución para equipo con falla de alto costo. Ejemplo 2

Etapas	Edad del equipo	Decisión
Etapas 1	1	MANTENER
Etapas 2	2	MANTENER
Etapas 3	3	MANTENER
Etapas 4	4	MANTENER
Etapas 5	5	REEMPLAZAR
Etapas 6	1	MANTENER

Fuente: Elaboración propia.

Similar al caso anterior el resultado muestra la necesidad de reemplazo del equipo antes del cumplimiento de su vida útil, más específicamente en el año 5 para este caso en particular.

Si bien estos casos de fallos de alto costo no son comunes si deben ser tenidos en cuenta como un riesgo para la operación del equipo en especial cuando se trata de equipos con impacto dentro de la operación con grado 1 en el que puede llegar a afectar un proceso crítico o misional de la empresa. Estará en las personas encargadas de la toma de decisiones si se asume el riesgo por tratarse de una frecuencia baja o se establece el cambio en el año 3 para evitar fallos de serpentín o en el año 5 para evitar fallos de daños de compresor en las capacidades presentadas como ejemplo

Consumo energético: En este proyecto se definió inicialmente incluir solamente los costos de preventivo y correctivo como costos de operación, sin embargo, teniendo en cuenta los resultados de solo mantener se puede realizar un análisis incluyendo el consumo energético del equipo como parte de los costos de operación para comparar los resultados con los anteriores. Para este ejercicio se propone tomar el consumo anual del equipo y asumir por experiencia un consumo mayor derivado del desgaste del equipo.

El consumo energético de un equipo de una tonelada de refrigeración es de 1160 W si suponemos un uso de 20 días al mes en horario estándar de 18 horas estaría dando un consumo de 5011.2 Kwh al año lo que equivaldría a \$1'703.808 por año con un costo de KWh de \$340, sin embargo, esto sería para un caso en que el equipo se encuentre nuevo pues en la medida que se deteriora el serpentín, motor y eje el equipo consume mayor energía.

Con el fin de calcular la constante que afectaría el consumo año a año se revisa el valor de corriente entre un año a otro pasando de un consumo de corriente de 5.2 Amperios a 5.64 Amperios para un factor del 7.0% de incremento. Si bien este valor es real del año 1 al año 2 se asume que para los años del 3 al 7 será constante.

La solución con estos datos fue de mantener en todas las etapas mostrando que la diferencia por concepto de energía no hace diferencia en la solución presentada al inicio.

Tabla 24. Solución para equipo incluyendo consumo energético

Etapas	Edad del equipo	Decisión
Etapas 1	1	MANTENER
Etapas 2	2	MANTENER
Etapas 3	3	MANTENER
Etapas 4	4	MANTENER
Etapas 5	5	MANTENER
Etapas 6	6	MANTENER

Fuente: Elaboración propia.

Aumento de vida útil: Teniendo en cuenta los resultados de mantener en la vida útil definida para los equipos con operación 24 horas se aplicó la metodología para revisar los resultados en caso de que a estos equipos se les alargara la vida a 7 años como la establecida para los aires acondicionados de operación estándar los cuales tienen menos uso y en teoría menores fallas y costos operativos. Para los datos de los tres años adicionales se utilizó la información de uno de los equipos que no ha sido cambiado pese a haber cumplido su vida útil.

Tabla 25. Solución para muestra de equipos 24 H con aumento de vida útil a 7 años

Etapas	Edad del equipo	Decisión
Etapa 1	1	MANTENER
Etapa 2	2	MANTENER
Etapa 3	3	MANTENER
Etapa 4	4	MANTENER
Etapa 5	5	MANTENER
Etapa 6	6	MANTENER

Fuente: Elaboración propia.

Escenarios consolidados: Por último y con el fin de contar con un panorama completo se hace la integración de los escenarios planteados utilizando la misma metodología, dándole a la empresa de contar con diferentes opciones para aplicar los planes según una situación particular o de forma general.

La metodología se aplicará a un equipo de xx toneladas de refrigeración utilizando el histórico de mantenimientos preventivos y correctivos comunes, incluyendo su costo de energía y la posibilidad de falla mayor por daño de compresor.

Los parámetros a utilizar se definen por :

$t = 1, 2, 3 \dots$ Número de años de uso de la máquina k .

$N(t)$ Costo por inversión en una nueva máquina k con edad t

$C(t)$ Costo de operación anual para la máquina k con edad t .

$S(t)$ Valor de salvamento para la máquina k con edad t .

$i = 1, 2, 3 \dots$ Periodo de análisis (años)

k : máquina de 1 tonelada de refrigeración de funcionamiento estándar

Teniendo en cuenta que el $N(t)$ debe variar con el tiempo y la información es basada en datos históricos de los equipos se asume la diferencia de valor del equipo nuevo basado en el IPC de cada año según la tabla 26.

Tabla 26. Índices de precios al consumidor 2009-2018

Año	Índice de precios al consumidor , IPC
2009	2,00
2010	3,17
2011	3,73
2012	2,44
2013	1,94
2014	3,66
2015	6,77
2016	5,75
2017	4,09
2018	3,18

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el $C(t)$ estará basado en los datos históricos del mantenimiento preventivo (C_p), el mantenimiento correctivo (C_c), el costo energético (C_e) de su operación y el costo de fallas de alto valor (C_f) definidas en los escenarios anteriores.

$$C(t) = C_p + C_c + C_e + C_f$$

En el caso del costo energético y asumiendo el mismo uso para todos los años, el valor aumenta con el paso del tiempo debido a factores como fricción, deterioro de intercambiadores de calor, eficiencia de los motores, entre otros. Para hacer esta corrección en los valores se realiza el cálculo del incremento porcentual en corriente del equipo y se asume este diferencial como el porcentaje de incremento en corriente año.

El costo de energía está dado por :

$$C_e = \text{Consumo energético} \times \text{tiempo de uso} \times \text{valor de energía}$$

La variación entre años estará dado por el incremento porcentual (F) explicado anteriormente

$$C_e(2) = C_e(1) * F$$

Este incremento de costo se dará de igual forma para los años siguiente

Para el caso de los costos por fallos de alto valor del equipo se asume que en su vida útil se puede dar un daño de este tipo siendo la probabilidad más baja en los primeros años hasta el último año. Al no conocer la distribución de esta probabilidad se supone que es lineal y se obtendrá u costo por este tipo de fallas resultante de la probabilidad por el valor del daño.

Elementos:

Los elementos para solucionar este caso se mantienen como los escenarios anteriores

- Etapas: Las etapas serán los años a analizar en el modelo y representado por la letra i
- Alternativas: Las alternativas en la etapa del año i son:
 REEMPLAZAR (R)
 MANTENER (M)
- El estado en la etapa i es la de edad de la máquina al inicio del año i

Función

Se utiliza la misma función teniendo en cuenta que los parámetros generales cuentan con la adición para los costos de consumo energético y la inclusión del costo probable de de la falla de alto valor

Función: $f(t)$ = Costo del equipo mínimo en los años $i, i+1, \dots n$

$f(t)$ min:

$$f_n(t) = \min \left\{ \begin{array}{ll} C(t) - S(t+1) & \text{si se MANTIENE} \\ C(0) - S(t) - S(1) + N & \text{si se REEMPLAZA} \end{array} \right\}$$

$$f_i(t) = \min \left\{ \begin{array}{ll} C(t) + f_{i+1}(t+1) & \text{si se MANTIENE} \\ C(0) - S(t) + N + f_{i+1}(1) & \text{si se REEMPLAZA} \end{array} \right\}, i=1,2,3,, n-1$$

La ecuación $f_n(t) = \min$ se utiliza para el caso del último año de operación del equipo en el que posterior a este se venden recuperando el valor de salvamento según la edad del mismo. Para las demás etapas se establece la función $f_i(t) = \min$ en el que se tienen en cuenta el valor acumulado de las etapas posteriores a la del análisis. Una de las grandes ventajas de la programación dinámica es poder separar en subproblemas el caso de estudio de tal forma que se pueda analizar y revisar en cada año de operación según la evolución de sus costos y cualquier factor que pueda afectar los parámetros como el valor a nuevo o el salvamento.

A continuación, se muestra la solución del modelo para lo cual se establecen los parámetros para un equipo de 1 tonelada de refrigeración de operación estándar. Como se explicó anteriormente se establece el porcentaje de incremento en costo por concepto energético

$C_e = \text{Consumo energético} \times \text{tiempo de uso} \times \text{valor de energía}$

$C_e = 1,16 \text{ Kw} \times 18 \text{ horas/día} \times 20 \text{ días/mes} \times 12 \text{ meses/año} \times 340\$/\text{Kw} = \$1'703.808 / \text{año}$

El factor a aplicar es del 7% correspondiente al aumento del consumo del primer año 5.27 A al segundo año 5.64 A. Teniendo en cuenta lo anterior el valor de consumo energético queda distribuido de la siguiente forma.

Tabla 27 Costo energético de equipo de una tonelada

Tiempo (años)	Costo energetico
0	\$ 1.703.808
1	\$ 1.823.075
2	\$ 1.950.690
3	\$ 2.087.238
4	\$ 2.233.345
5	\$ 2.389.679
6	\$ 2.556.956

Fuente: Elaboración propia.

El costo de falla de alto valor queda definido por el costo de la falla que es de \$1'850.000 y que se distribuye linealmente como se muestra en la tabla 28 .

Tabla 28. Costo de falla de alto valor

Tiempo (años)	Distribucion	Costo de falla de alto valor
0	0,14	\$ 257.143
1	0,29	\$ 514.286
2	0,43	\$ 771.429
3	0,57	\$ 1.028.571
4	0,71	\$ 1.285.714
5	0,86	\$ 1.542.857
6	1	\$ 1.800.000

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente el valor de parámetros para la solución queda de acuerdo a la tabla 29 :

Tabla 29. Datos para escenario consolidado

Año	Tiempo (años)	Costo de operacion C(t), (\$)	Salvamento, S(t) (\$)	Costo de máquina nueva N(t)
2012	0	\$ 2.102.865		\$ 2.135.235
2013	1	\$ 2.394.084	\$ 1.358.250	\$ 2.187.335
2014	2	\$ 2.685.985	\$ 1.144.375	\$ 2.229.769
2015	3	\$ 2.776.959	\$ 930.500	\$ 2.311.379
2016	4	\$ 3.083.629	\$ 716.625	\$ 2.467.859
2017	5	\$ 3.389.781	\$ 502.750	\$ 2.609.761
2018	6	\$ 3.693.657	\$ 288.875	\$ 2.716.500
			\$ 75.000	

Fuente: Elaboración propia.

Se plantea red a 7 años, y en este último la obligatoriedad del cierre con salvamento como se muestra en la figura 32

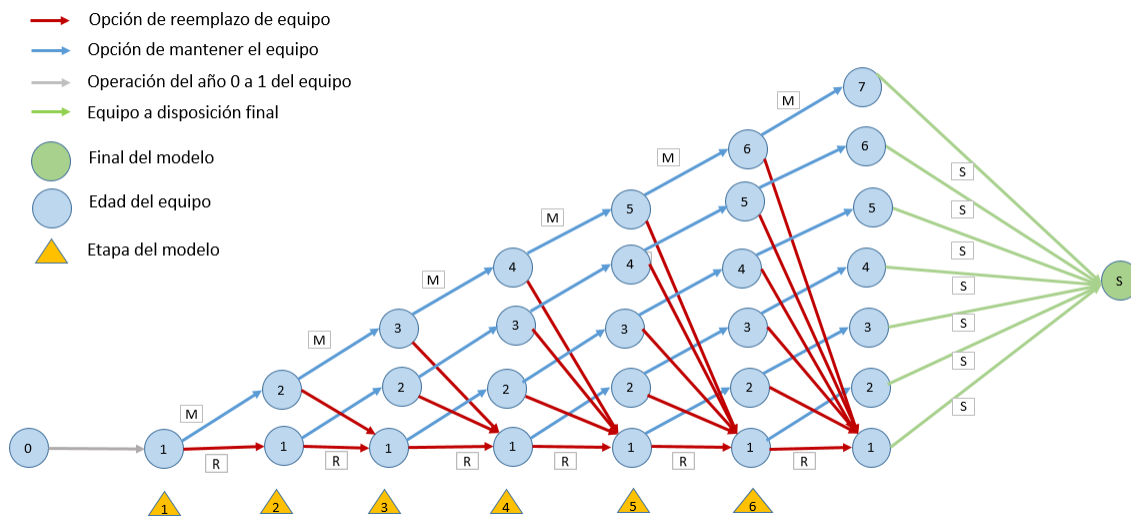


Figura 32. Red de modelo para escenario integrado

Se evalúa el problema para cada etapa con las ecuaciones planteadas llegando al siguiente resultado mostrado en la tabla 30

Tabla 30. Resultado análisis de etapas para para escenario integrado

ETAPA 6

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) - S(t+1)$	$C(0) - S(t) - S(1) + N(t)$		
1	\$ 1.249.709	\$ 1.573.700	\$ 1.249.709	MANTENER
2	\$ 1.755.485	\$ 1.830.009	\$ 1.755.485	MANTENER
3	\$ 2.060.334	\$ 2.125.494	\$ 2.060.334	MANTENER
4	\$ 2.580.879	\$ 2.495.849	\$ 2.495.849	REEMPLAZAR
5	\$ 3.100.906	\$ 2.851.626	\$ 2.851.626	REEMPLAZAR
6	\$ 3.618.657	\$ 3.172.240	\$ 3.172.240	REEMPLAZAR

ETAPA 5

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 4.149.569	\$ 4.505.650	\$ 4.149.569	MANTENER
2	\$ 4.746.318	\$ 4.761.959	\$ 4.746.318	MANTENER
3	\$ 5.357.838	\$ 5.057.444	\$ 5.057.444	REEMPLAZAR
4	\$ 6.184.535	\$ 5.427.799	\$ 5.427.799	REEMPLAZAR
5	\$ 7.008.438	\$ 5.783.576	\$ 5.783.576	REEMPLAZAR

ETAPA 4

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 7.140.403	\$ 7.437.600	\$ 7.140.403	MANTENER
2	\$ 8.043.823	\$ 7.693.909	\$ 7.693.909	REEMPLAZAR
3	\$ 8.961.494	\$ 7.989.394	\$ 7.989.394	REEMPLAZAR
4	\$ 10.092.068	\$ 8.359.749	\$ 8.359.749	REEMPLAZAR

ETAPA 3

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 10.437.907	\$ 10.369.550	\$ 10.369.550	REEMPLAZAR
2	\$ 11.647.479	\$ 10.625.859	\$ 10.625.859	REEMPLAZAR
3	\$ 12.869.026	\$ 10.921.344	\$ 10.921.344	REEMPLAZAR

ETAPA 2

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 9.253.395	\$ 13.301.500	\$ 9.253.395	MANTENER
2	\$ 10.183.042	\$ 13.557.809	\$ 10.183.042	MANTENER

ETAPA 1

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	
1	\$ 12.577.126	\$ 16.233.450	\$ 12.577.126	MANTENER

Fuente: Elaboración propia.

Finalizado el análisis de las etapas se revisa el resultado encontrando que en el año 1 se debe mantener el equipo , al igual que el año 2 , sin embargo ara el año 3 se tiene un variación solicitando reemplazar la máquina. Para el año 4 el equipo tendría 1 año de edad por lo que en la etapa 4 se muestra que el equipo se debe mantener al igual que en la etapa 5 en donde el equipo tendría 2 años y en la sexta etapa cuando cuenta con 3 años. En el 7 año el equipo debe pasar a salvamento dado que es el fin del planteamiento

Teniendo en cuenta lo anterior la propuesta para este escenario es mostrada en el gráfico

33

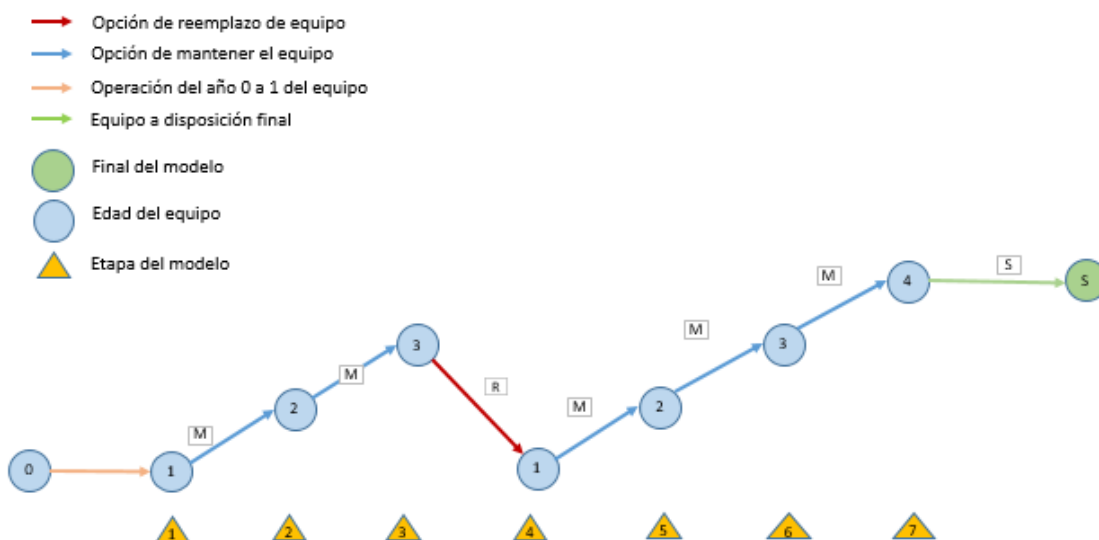


Figura 33. Resultado red para escenario integrado

3.3.6 Análisis de resultados

Después de utilizar programación dinámica para diferentes capacidades se obtiene como solución por esta metodología que los equipos de todas las capacidades se deben mantener durante el ciclo de vida útil definido a 7 años.

Las principales razones por las que los equipos muestran una larga vida útil es que sus costos de operación son muy bajos comparados con lo que se puede obtener como salvamento del equipo y principalmente la diferencia de estos con el valor a nuevo del mismo. Por ejemplo, en el Anexo 2 se puede observar que para un equipo de 5 toneladas de refrigeración de operación estándar su valor a nuevo es de \$9'852.500 mientras que su valor de salvamento en el último año es de \$125.000 equivalente solo a un 1%. Los costos de operación representan en promedio el 13% anual comparado con el valor del equipo a nuevo.

Al revisar los costos de operación para la misma capacidad de equipo, los costos por mantenimiento correctivo solo son en promedio el 22% del total de costos totales del equipo mostrando una baja inversión por fallas y un valor importante correspondiente al 78% de este rubro para mantenimiento preventivo.

Básicamente lo que se muestra es que con el plan de mantenimiento actualmente implementado se está llevando el equipo a un punto de evitar la falla evitando costos por

correctivos. En la Figura 34 se muestra como la ejecución de mantenimientos preventivos permite alargar la vida del equipo manteniéndolo en correcta operación y evitando la falla

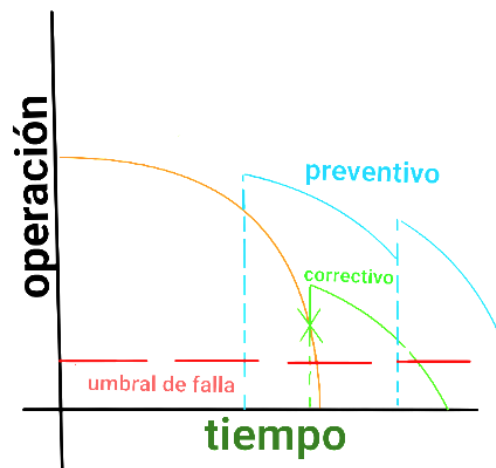


Figura 34. Ventaja de la ejecución de mantenimiento preventivo para alargar la vida útil del equipo.

Fuente: Elaboración propia.

La información revisada anteriormente muestra que el plan de mantenimiento actual es efectivo para el cumplimiento de vida útil del equipo incluso, pero no necesariamente es eficiente logrando unos costos de correctivos bajos con respecto al costo del equipo nuevo y bajo nivel de fallas. Podría adelantarse una revisión del plan reduciendo la frecuencia de mantenimientos preventivos para disminuir los costos sin repercutir en un aumento de fallas que afecte la operación de los equipos. Lo anterior se lograría al encontrar el punto óptimo entre los costos preventivos y correctivos que, de acuerdo con los datos obtenidos y

resultados encontrados, el mantenimiento llevado a cabo actualmente se encuentra al lado derecho del punto óptimo. Ver Figura 35

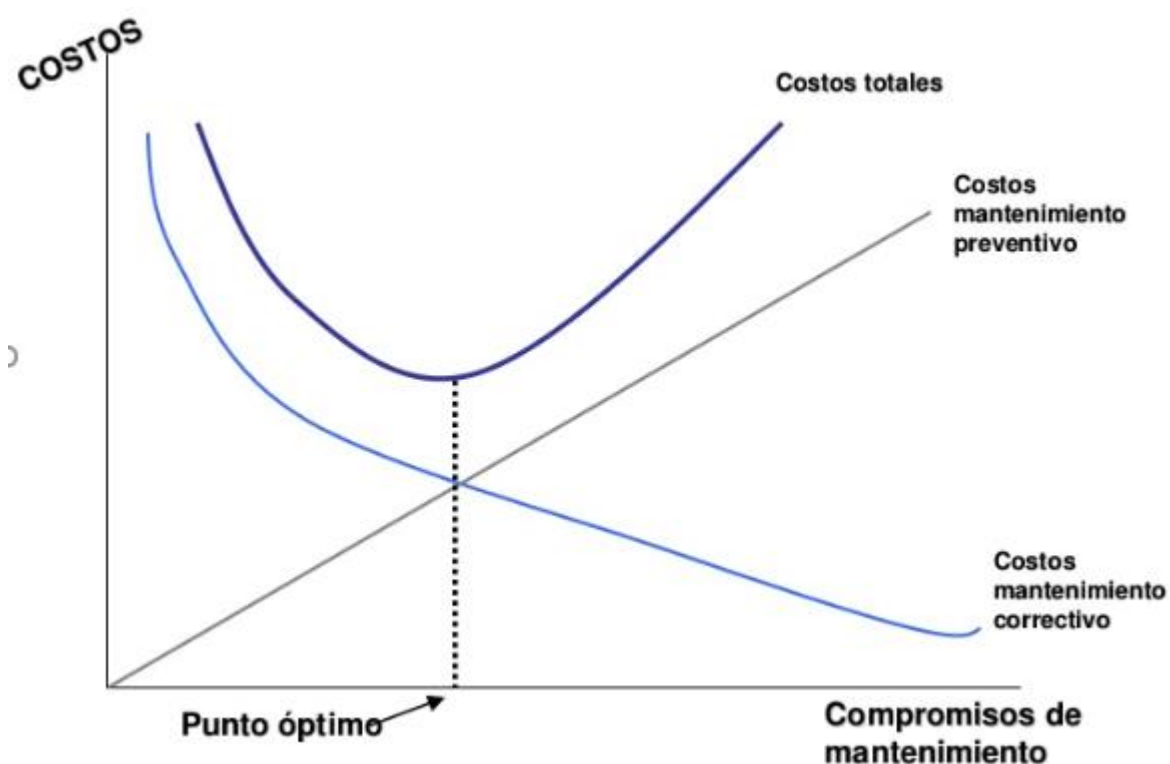


Figura 35. Curva de costo óptimo para mantenimiento

De lo anterior y los resultados positivos en cuanto al mantenimiento que actualmente se realiza se puede definir una primera política relacionada con la obligatoriedad de definir plan de mantenimiento preventivo para cualquier equipo de expansión directa que sea adquirido por la Universidad independiente de su capacidad, esto también genera un punto para el plan de renovación y mantenimiento encaminado a la sostenibilidad del negocio en el que se asegure que todos los equipos de expansión directa sean incluidos en el contrato de mantenimiento y cuenten con frecuencia en el software que actualmente cuenta la Universidad para este fin.

Por otra parte, la alta diferencia entre el preventivo y el correctivo que se da en este momento, encamina a opciones para optimizar estos valores y si bien no se puede generar una política con respecto a este punto, si se puede incluir en el plan a presentar una actividad para revisar la posibilidad de obtener datos de fallo que permitan utilizar otras metodologías como confiabilidad o simulación, en el que se tiene en cuenta la probabilidad de falla de acuerdo a valores históricos, esto se hace evidente dado que al utilizar programación dinámica para fallos de altos costos en dos equipos de capacidades y fallos distintos se da la opción de reemplazar en el año del fallo o inclusive antes del mismo como se muestra en las tablas 22 y 23, anticipándose a los altos costos de la falla. Para el caso del fallo del serpentín un año antes de la ocurrencia de la falla solicita el reemplazo del equipo. En la medida que se cuente con información de probabilidad de falla se puede enriquecer el proceso realizado y así optimizar el cambio de equipo.

En análisis de esta misma información si comparamos que tanto el método utilizado por la Universidad para estos casos entregó como resultado el reemplazo del equipo al igual que la programación dinámica se podría generar una política de el uso de las dos herramientas en el momento en que se tenga una falla de alto costo con el fin de facilitar y justificar la decisión de cambio. Los resultados pueden ser complementarios porque mientras la primera opción buscar obtener un valor real del equipo basado en su valor a nuevo y vida útil la programación dinámica tiene en cuenta el comportamiento a nivel de costos en el tiempo dando una perspectiva no solamente financiera sino del mantenimiento del equipo.

En la aplicación de programación dinámica en el que se incluye los costos energéticos en la operación del equipo se evidencia que no presentó variación en los resultados generando la opción de mantener como la óptima para el caso puntual del equipo de 1 tonelada de refrigeración. El porcentaje de variación de año a año es del 2% sin embargo en la medida que esta variación sea mayor la decisión de mantener es menos factible dado que por la función minimizar planteada para la opción de mantener aumenta mientras que la de reemplazar se mantiene estática, en conclusión, en la medida que se tenga mayor consumo energético o más desgaste entre años que implique mayores costos la posibilidad de reemplazar aumenta generando gastos o inversiones para la empresa. Por ejemplo, continuado con el mismo equipo de 1 tonelada de refrigeración y analizando las funciones para mantener o reemplaza en un escenario uno con aumento de energía del 2% mientras que en el mismo equipo un escenario de aumento de energía del 7% se genera una solución diferente siendo la opción de reemplazar para el que tuvo mayor incremento de costos como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31. Comparativo en etapas para incrementos de energía diferentes

ETAPA 3				
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 7.352.193	\$ 9.340.979	\$ 7.352.193	MANTENER
2	\$ 7.790.336	\$ 9.597.288	\$ 7.790.336	MANTENER
3	\$ 8.240.455	\$ 9.892.772	\$ 8.240.455	MANTENER

Incremento de consumo energético del 2% por año

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 8.283.663	\$ 9.340.979	\$ 8.283.663	MANTENER
2	\$ 9.145.153	\$ 9.597.288	\$ 9.145.153	MANTENER
3	\$ 10.055.415	\$ 9.892.772	\$ 9.892.772	REEMPLAZAR

Incremento de consumo energético del 7% por año

Lo anterior conduce a tener un control importante del consumo energético y los incrementos entre años que usualmente se dan por el deterioro de los equipos. Técnicamente la forma de evitar incrementos altos de energía en equipos de aire acondicionado está en la correcta limpieza de los intercambiadores de calor y evitar falsos contactos en los puntos de conexión.

Al revisar los resultados y teniendo en cuenta que el modelo para los equipos 24 horas no mostraron la necesidad de reemplazo en su vida útil de 4 años se procedió a llevar el modelo a 7 años como los demás equipos de operación estándar encontrando que los valores de correctivos de los tres años adicionales no implicaban el cambio de decisión por reemplazo, es decir que se podría aumentar la vida útil propuesta para esta gama de equipos al menos a la política establecida para los equipos de operación estándar

Actualmente la Universidad tiene definido para los equipos de expansión directa de operación estándar una vida útil de 7 años mientras que para los de operación 24 horas se utiliza un periodo máximo de 4 años. Como se puede ver en las Anexo 2 los resultados arrojan que es correcto mantenerlos en operación durante este tipo pues en los dos casos la solución del modelo de optimización fue mantener para la vida útil planteada.

En el planteamiento integral en el que se incluyeron los consumos energéticos y la posible falla de alto valor se da un resultado de cambio de equipo al tercer año, sin embargo,

este caso es muy puntual y bastante conservador considerando que los casos históricos que se tienen son muy pocos. Este aplicaría e caso de requerirse una confiabilidad muy alta al punto de tener que invertir alta cantidad de recursos económicos en el cambio de equipos con el fin de evitar este tipo de daños.

4. POLÍTICAS Y PLAN DE RECAMBIO DE EQUIPOS DE EXPANSIÓN

DIRECTA

Las políticas y el plan de renovación para la Universidad son producto del estudio realizado y deberán ser evaluadas de acuerdo al entorno de la organización y otros factores que no se ha tenido en cuenta en el desarrollo del modelo como son las políticas contables y financieras de la organización, aspectos legales y cambios en la infraestructura realizados por la organización

4.1. Políticas para equipos de expansión directa

Una primera conclusión evidente del primer ejercicio en el que se utilizó programación dinámica para diferentes capacidades de equipo es el resultado de mantener a todo lo largo de su vida útil (Ver Figura 30 y Tabla 18), esto combinado con la observación realizada de bajas fallas y un costo de correctivo bajo llevan a definir una política que asegure que todo equipo nuevo tenga plan de mantenimiento desde que entra en operación. Se sugiere para la política dos meses de tiempo para que los efectos de fallas por montaje sean de revisión por parte de la sección encargada del proyecto y posteriormente pase a responsabilidad de la sección de mantenimiento. Teniendo en cuenta esto la primera política sería:

- *Todo equipo de aire acondicionado debe contar con plan de mantenimiento preventivo posterior a los dos primeros meses de uso.*

En el caso de fallo de alto costo se puede generar una política que permita validar y evidenciar una correcta decisión en cuanto al reemplazo o cambio del equipo, actualmente solo se cuenta con una fórmula utilizada por las aseguradoras para la toma de decisión en cuanto a dar el equipo como pérdida total. El complementar esta revisión con el uso de programación dinámica permite conocer una decisión basada en los costos operativos y no solo en el valor a nuevo y vida útil utilizada actualmente. Teniendo en cuenta lo anterior se puede generar una política de obligatoriedad de revisión por los dos métodos, sin embargo, para que esta pueda ser puesta en práctica inicialmente se debe incluir en el plan de renovación y mantenimiento de equipos una actividad que formalice dentro de los procedimientos e instructivos del sistema de gestión de calidad el uso de las dos herramientas. En el caso de los ejemplos utilizados para fallos de alto costo se hace necesario el reemplazo como se evidencia en los resultados mostrados en las Tablas 22 y 23

- *Aquellos equipos que presenten fallas de alto costo, asumido como repuestos con un valor superior al 50% del valor a nuevo, deberán ser evaluados con las herramientas de informe de pérdida total y programación dinámica en el que se pueda evidenciar la necesidad de reemplazar o mantener el equipo.*

En el análisis de programación dinámica teniendo en cuenta el consumo energético se evidenció la necesidad de control técnico para que el aumento de su edad represente lo menor posible un aumento de costos y así evitar reemplazos innecesarios que se pudieron haber manejado con acciones dentro del mantenimiento preventivo de los equipos. Acciones como estas no solo implican ahorros en el momento de la facturación de energía

sino en evitar inversiones por cambio de equipos. Ver Tabla 26 Lo anterior deriva en plantear una política que obligue al control del consumo energético para estos equipos y un plan que permita establecer líneas bases de consumo según las capacidades de aires acondicionados.

- *La sección de mantenimiento debe incluir en sus contratos de aire acondicionado controles a través de informes en que se evidencie la gestión de consumo energético en sus actividades de mantenimiento preventivo*

Siguiendo con el mismo argumento el cambio tecnológico ayuda a la disminución de los costos por consumo energético, es por esto que se hace necesario que cumplida su vida útil los equipos sean renovados o para el caso específico de los aires acondicionados el cambio de refrigerante hace una diferencia en el ítem de energía y similar al comparativo realizado en la Tabla 26 implicaría mayores costos y por lo tanto la necesidad de reemplazo antes del cumplimiento de vida útil. Con el fin de asegurar que estos cambios sean realizados se proponen las siguientes políticas

- *Todo aire acondicionado a cambiar debe ser reemplazado por equipos con refrigerante amigable con el medio ambiente*
- *Posterior al cumplimiento de vida útil el equipo deberá ser presupuestado para cambio por la oficina responsable del mismo*

Los equipos 24 horas tienen actualmente definida una vida útil de 4 años sin embargo en la aplicación de conceptos de programación dinámica se pudo evidenciar que igualando la vida útil a los equipos de 7 años no se tenían variaciones en el resultado (Ver tabla 25) siendo la decisión más óptima desde el punto de vista de minimizar los costos el de mantener a lo largo de este tiempo es por esto que se sugiere plantear una política general para todos los equipos independiente de su operación llevando a un valor de 7 años la vida útil.

- *Los equipos de expansión directa contarán con una vida útil de 7 años para todas sus capacidades, posterior a este tiempo deberán ser reemplazados de acuerdo a una evaluación técnico económica que permita la mejor decisión de adquisición.*

4.1. Plan de renovación y mantenimiento de equipos expansión directa

Tabla 32. Plan de renovación y mantenimiento de equipos de expansión directa

Objetivo	Enfoque	Estrategia	Actividad	Área responsable	Áreas que intervienen	Tiempo de ejecución	Presupuesto	Indicador de cumplimiento
Asegurar la sostenibilidad y operación del negocio	Reemplazo de equipos	Cambio de equipos de aire acondicionado de expansión directa que no cuenten con refrigerantes amigables con el medio ambiente	Cambio de 69 equipos correspondientes a 327 toneladas de refrigeración que actualmente no cumplen con el criterio de uso de refrigerante amigable con el medio ambiente	Dirección de servicios administrativos	Presupuesto - Mantenimiento - Proyectos de infraestructura - Almacén - Oficinas usuarias	3 años	\$ 661.000.000	Cumplimiento - Toneladas Cambiadas / Total toneladas a cambiar - Anual
Asegurar la sostenibilidad y operación del negocio	Mantenimiento de equipos	Incluir en plan de mantenimiento preventivo los equipos nuevos de aire acondicionado que sean montados por remodelaciones o por ingreso de nuevos edificios	-Informar por parte de comité técnico y comité de planta física todos los equipos a ingresar como parte de infraestructura de la universidad -Ingresar en contrato y software de mantenimiento los equipos reportados por parte de los comité	Comité de planta física y comité técnico Dirección de servicios administrativos	Proyectos de infraestructura. Planeación Almacén Oficinas usuarias	Permanente	Depende de índice de construcción anual – Debe ser informado con tiempo para incluir en presupuesto de la sección de mantenimiento	Equipos nuevos en plan de mantenimiento/ Total de equipos nuevos - Anual

Asegurar la sostenibilidad y operación del negocio	Mantenimiento de equipos (predictivo)	Establecer probabilidad de falla de equipos	Revisión de software que permitan el manejo de modelos que permitan predecir fallas como confiabilidad o simulación	Sección de mantenimiento	Dirección de tecnología	1 año	\$50.000.000. Para viabilidad del proyecto	Viabilidad ejecutada
Asegurar la sostenibilidad y operación del negocio	Mantenimiento de equipos	Continuar con el plan establecido de mantenimiento	Presupuestar anualmente el mantenimiento preventivo mensual de los equipos de aire acondicionado de expansión directa	Sección de mantenimiento	Presupuesto Oficinas usuarias	1 año	\$320.000.000	Toneladas de refrigeración en mantenimiento / Total de toneladas de refrigeración – Mensual
Mantener tecnología actualizada	Reemplazo de equipos	Cambio de equipos de aire acondicionado de expansión directa que cuenten con vida útil cumplida propendiendo la eficiencia energética y optimización de su uso	Cambio de 27 equipos de operación estándar que cuentan con vida útil cumplida	Dirección de servicios administrativos	Presupuesto - Mantenimiento - Proyectos de infraestructura - Almacén - Oficinas usuarias	1 año	\$ 152.000.000	Cumplimiento - Toneladas Cambiadas / Total toneladas a cambiar - Anual
Optimizar recursos	Mantenimiento y reemplazo de equipos	Revisión de vida útil de equipos de aire acondicionado de expansión directa de uso 24 horas	Ajustar la vida útil de equipos de aire acondicionado de expansión directa a 7 años	Dirección de servicios administrativos	Almacén - Contabilidad	1 año	\$ No aplica	Ejecución de la actividad

Optimizar recursos	Reemplazo de equipos	Formalizar procedimientos e instructivos para la toma de decisiones de mantener o reemplazar equipos	Definir procedimientos e instructivos para la toma de decisiones en casos que se presenten fallos de alto costo	Sección de mantenimiento	Gestión de calidad	6 meses	No aplica	Ejecución de la actividad
Optimizar recursos	Mantenimiento de equipos	Eficiencia energética	Definir líneas bases de consumo energético para los equipos de diferentes capacidades de tal forma que permita el control en el tiempo dentro de los mantenimientos preventivos	Sección de mantenimiento	Servicios generales. Departamento de ingeniería eléctrica	6 meses	No aplica	Ejecución de la actividad

5. CONCLUSIONES

En cuanto a las características del modelo matemático construido, se determinó que la programación dinámica resulta una herramienta adecuada para poder identificar, integrar y analizar la relación entre las variables de riesgo, desempeño y costo para los equipos estudiados. No obstante, se podrían llevar a cabo ejercicios de programación dinámica probabilística en donde el componente de aleatoriedad en los fallos que requieren mantenimiento correctivo puedan ser incluidos en el modelo. Posteriormente, ejercicios de simulación podrían ayudar a identificar políticas más específicas, que dependan no solo de la capacidad del equipo, sino también de su ubicación, tipos de mantenimientos preventivos realizados, condiciones climáticas, y todas aquellas variables que hagan parte de un modelo de simulación.

El uso de programación dinámica permite concluir que lo realizado por la Universidad hasta el momento en cuanto a contar con planes de mantenimiento para estos equipos es una excelente opción desde el punto de vista de costos dado que permite asegurar el cumplimiento de la vida útil a unos costos razonables de mantenimiento preventivo y manteniendo costos muy bajos por trabajos y repuestos debido a fallas de los equipos.

Hasta el momento no se han registrado quejas por parte de los usuarios con respecto a la disponibilidad del servicio de aire acondicionado en la universidad, lo cual indica que los ciclos, y paradas por mantenimiento preventivo son acordes a su necesidad, y tiempos cortos respectivamente. Este es un indicador de alto nivel de servicio, que entrega peso a los

resultados obtenidos en cuanto a asertividad del plan de mantenimiento ejecutado actualmente por la universidad.

La programación dinámica cuenta con ventajas importantes en la medida que se cuenta con la información de costos de operación del equipo o que se tenga una forma de predecir de forma confiable las opciones y costos de fallo a futuro, casos como las fallas de alto costo que no corresponden a un desgaste continuo de la máquina sino a casos aleatorios pueden influir de forma importante en la decisión de mantener o reemplazar, es por esto que se sugiere se complemente con metodologías de predicción de fallas como simulación para obtener resultados que abarquen la aleatoriedad.

Uno de los factores que más incide en la decisión de reemplazo de equipo es todo lo que tiene que ver con el incremento en costos de operación en la medida en que el equipo envejece, es por esto, que se debe prestar especial atención al control de costos de mantenimiento preventivo, correctivo, consumo energético o cualquiera que afecte en este parámetro si se quiere evitar el reemplazo de equipos prematuros.

Actualmente en muchas empresas se toman decisiones por percepción y no con datos reales analizados bajo un modelo, a lo largo de este proyecto se presentaron varios casos en los que se evidenció que el análisis cualitativo no coincide con la solución más óptima arrojada por el modelo, en primera medida el valor esperado era que los equipos generaran una menor vida útil implicando cambios anterior a la definida sin embargo al contrario de esta percepción el resultado fue la opción de mantener durante el tiempo de vida útil del

equipo sin la necesidad de recambio en edades intermedias, por otra parte equipos que se creían que tenían una vida útil de 4 años se logró demostrar que podían ser llevados a una vida útil mayor sin riesgos significativos de daños o deterioro que implicaran cambio en los tres siguientes años .

El proyecto permitió el conocimiento de una metodología que puede ser aplicada en la Universidad del Norte y en cualquier empresa para diversas familias de equipo en el que se puede lograr obtener una red basada en programación dinámica que permita tomar decisiones en cuanto a mantener o reemplazar los equipos basado en su histórico de costos, valor de salvamento y equipo nuevo. En el caso puntual de la Universidad la misma adaptación del modelo se puede llevar a equipos como transformadores, plantas de emergencias y ups de los cuales existen datos y pueden arrojar información valiosa para presupuestar el mantenimiento y optimizar los recursos asignados a la sección de mantenimiento. El proceso siguiente a este proyecto y que por temas de tiempo no se encontraba en el alcance del mismo es poder verificar los resultados con el comportamiento real de los equipos al igual que poder llevar a cabo el plan de mejora en cuanto a renovación y mantenimiento de los equipos.

En caso de que se quiera seguir con el proyecto a nivel académico se podría avanzar en la combinación de modelos, por ejemplo, aplicarlo en empresas en que cuenten con técnicas de mantenimiento centrado en confiabilidad con el que se podrían validar los resultados en equipos o desarrollar una combinación de los mismos utilizando los datos de probabilidad de falla como insumo para programación dinámica.

Como recomendación para la empresa, está el cambio en el corto y mediano plazo de equipos que utilizan refrigerantes no amigables con el medio ambiente, como se pudo evidenciar y quedo manifestado en el plan de mejora propuesto tiene beneficios desde el punto de vista de continuidad del negocio, visibilidad de la Universidad como cumplidora ambientalmente y evita el aumento de costos que pueden llevar a contar con equipos en operación fuera de lo óptimo.

Como un alcance superior a este proyecto, se plantea la utilización de otros modelos, sean matemáticos multi variables, o cualitativos, con lo cual, se pueda realizar un análisis comparativo de las soluciones, y decidir si la solución óptima encontrada, varía frente a la actualmente conocida con este proyecto.

REFERENCIAS

Asociación Colombiana de Ingenieros. (2018). Diagnóstico del Mantenimiento en Colombia.

Retrieved from

https://educacion.aciem.org/CIMGA/2018/Especial/Escrito/Cartilla_Mantenimiento_Colombia.pdf

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2015). Gestión de activos: familia de normas UNE-ISO 55000. Madrid: AENOR Ediciones.

Bellman, R. (1955). Equipment replacement policy. *Journal of the society for industrial and applied Mathematics*, 3(3), 133-136.

Cantillo Maza, V. (2011). Reemplazo económico de los equipos. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, (3_4), 58-63.

Castro, W. A. S., Castrillón, O. D., Gonzales, G., & Folleco, A. V. (2011). Una aplicación multi-criterio para la decisión de reemplazar un equipo. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*; No 25 (2009): Enero-Junio.

Cruz Moreno, F. D. M., Ortiz, V., & Roxana, M. (2017). Técnicas de programación dinámica y su implementación en hojas de cálculo (Doctoral dissertation).

Folleco, A. V., González, G. A., & RODRÍGUEZ, R. (2004). Aproximación al reemplazo de equipo industrial. *Scientia et technica*, 2(25).

Hillier, F., & Lieberman, G. (1996). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México, D.F.: McGraw Hill.

Institute of Asset Management. (2015). *Asset management: an anatomy*. Bristol, United Kingdom: The Institute of Project Management.

Malisani, E. A. A., & Arbones, E. A. (1989). *Optimización industrial II: programación de recursos* (Vol. 2). Marcombo.

Molina, J. (2006). *Mantenimiento y seguridad industrial*. IMU: Ingeniería municipal.

Monchy, F., & Fraxanet. S. M. (1990). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial*. Barcelona: Masson.

Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., & Linares, P. (2010). *Modelos matemáticos de optimización*. Publicación Técnica, 1.

Real Academia Española. (2018). *Diccionario de la Lengua Española*. 23ra edición electrónica. Madrid: Autor.

Universidad del Norte. (2018). Boletín Estadístico 2018 (C. Fernández & D. Gutiérrez, Eds.).

<https://doi.org/https://www.uninorte.edu.co/documents/10698/14183477/Boletin+Estadistico+2019+%281%29.pdf/63258f7a-09cc-4a72-8cb8-15805f426c27>

Universidad del Norte. (2019). Caracterización del Proceso de Mantenimiento de Planta Física, Muebles y Equipos. Barranquilla: Universidad del Norte - Dirección de Servicios Administrativos.

Woodhouse, J. (2014). Asset management decision-making: the SALVO process. Kingsclere, Hampshire: The Woodhouse Partnership Ltd.

ANEXO 1.

Tabla de características y parámetros de equipos de expansión directa

ANEXO 2.

Tabla de datos y resultados de acuerdo con la capacidad de equipos

	Capacidad	0,75	1	1,5	2	7,5
	Operación	24 H	24 H	24 H	24 H	24 H
Costo operación C(t)	C1		\$ 141.914	\$ 212.872	\$ 377.789	\$ 1.320.358
	C2		\$ 141.914	\$ 280.140	\$ 283.829	\$ 1.064.358
	C3		\$ 141.914	\$ 212.872	\$ 283.829	\$ 1.331.460
	C4		\$ 319.341	\$ 296.153	\$ 394.871	\$ 1.531.631
	C5	\$ 158.101	\$ 252.561	\$ 316.202	\$ 515.563	\$ 2.557.250
	C6	\$ 167.194	\$ 864.530	\$ 401.656	\$ 445.850	\$ 1.671.938
	C7	\$ 174.027	\$ 232.036	\$ 348.054	\$ 464.071	\$ 1.740.268
Salvamento S(t)	S1	\$ 1.175.000	\$ 1.358.250	\$ 1.427.500	\$ 1.475.000	\$ 6.048.133
	S2	\$ 808.333	\$ 930.500	\$ 976.667	\$ 1.008.333	\$ 4.165.422
	S3	\$ 441.667	\$ 502.750	\$ 525.833	\$ 541.667	\$ 2.282.711
	S4	\$ 75.000	\$ 75.000	\$ 75.000	\$ 75.000	\$ 400.000
	S5					
	S6					
	S7					
Valor a nuevo	N1		\$ 2.135.235	\$ 2.244.099	\$ 2.318.772	\$ 9.507.959
	N2		\$ 2.187.335	\$ 2.298.855	\$ 2.375.350	\$ 9.739.953
	N3		\$ 2.229.769	\$ 2.343.453	\$ 2.421.431	\$ 9.928.908
	N4		\$ 2.311.379	\$ 2.429.224	\$ 2.510.056	\$ 10.292.306
	N5		\$ 2.467.859	\$ 2.593.682	\$ 2.679.987	\$ 10.989.095
	N6		\$ 2.609.761	\$ 2.742.819	\$ 2.834.086	\$ 11.620.968
	N7	\$ 2.350.000	\$ 2.716.500	\$ 2.855.000	\$ 2.950.000	\$ 12.096.266
RESULTADOS	Capacidad (Tr)	0,75	1	1,5	2	7,5
	Operación	24 H	24 H	24 H	24 H	24 H
	Etapas		Resultado	Resultado	Resultado	Resultado
	t1		MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t2		MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t3		MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t4		MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t5					
	t6					
	t7					

	Capacidad	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
	Operación	STD	STD	STD	STD	STD	STD	STD	STD
Costo operación C(t)	C1	\$ 141.914	\$ 212.872	\$ 283.829		\$ 425.743	\$ 567.658	\$ 809.476	\$ 851.486
	C2	\$ 141.914	\$ 212.872	\$ 283.829		\$ 439.442	\$ 879.487	\$ 1.075.709	\$ 2.136.464
	C3	\$ 141.914	\$ 212.872	\$ 293.756		\$ 567.442	\$ 830.569	\$ 712.415	\$ 1.342.166
	C4	\$ 197.435	\$ 296.153	\$ 468.850		\$ 606.005	\$ 1.392.978	\$ 1.477.051	\$ 1.229.852
	C5	\$ 210.801	\$ 629.402	\$ 810.505		\$ 632.404	\$ 934.518	\$ 1.807.253	\$ 1.385.549
	C6	\$ 222.925	\$ 379.392	\$ 445.850		\$ 1.122.105	\$ 891.700	\$ 1.212.442	\$ 1.382.790
	C7	\$ 232.036	\$ 454.990	\$ 464.071		\$ 854.823	\$ 928.143	\$ 1.532.440	\$ 1.392.214
Salvamento S(t)	S1	\$ 1.358.250	\$ 1.427.500	\$ 1.475.000	\$ 1.775.000	\$ 2.229.500	\$ 3.532.500	\$ 4.926.250	\$ 5.050.000
	S2	\$ 1.144.375	\$ 1.202.083	\$ 1.241.667	\$ 1.491.667	\$ 1.878.750	\$ 2.964.583	\$ 4.126.042	\$ 4.275.000
	S3	\$ 930.500	\$ 976.667	\$ 1.008.333	\$ 1.208.333	\$ 1.528.000	\$ 2.396.667	\$ 3.325.833	\$ 3.500.000
	S4	\$ 716.625	\$ 751.250	\$ 775.000	\$ 925.000	\$ 1.177.250	\$ 1.828.750	\$ 2.525.625	\$ 2.725.000
	S5	\$ 502.750	\$ 525.833	\$ 541.667	\$ 641.667	\$ 826.500	\$ 1.260.833	\$ 1.725.417	\$ 1.950.000
	S6	\$ 288.875	\$ 300.417	\$ 308.333	\$ 358.333	\$ 475.750	\$ 692.917	\$ 925.208	\$ 1.175.000
	S7	\$ 75.000	\$ 75.000	\$ 75.000	\$ 75.000	\$ 125.000	\$ 125.000	\$ 125.000	\$ 400.000
Valor a nuevo	N1	\$ 2.135.235	\$ 2.244.099	\$ 2.318.772	\$ 2.790.386	\$ 3.504.882	\$ 5.553.262	\$ 7.744.304	\$ 7.938.845
	N2	\$ 2.187.335	\$ 2.298.855	\$ 2.375.350	\$ 2.858.472	\$ 3.590.401	\$ 5.688.761	\$ 7.933.265	\$ 8.132.553
	N3	\$ 2.229.769	\$ 2.343.453	\$ 2.421.431	\$ 2.913.926	\$ 3.660.055	\$ 5.799.123	\$ 8.087.171	\$ 8.290.325
	N4	\$ 2.311.379	\$ 2.429.224	\$ 2.510.056	\$ 3.020.576	\$ 3.794.013	\$ 6.011.371	\$ 8.383.161	\$ 8.593.751
	N5	\$ 2.467.859	\$ 2.593.682	\$ 2.679.987	\$ 3.225.069	\$ 4.050.868	\$ 6.418.341	\$ 8.950.701	\$ 9.175.548
	N6	\$ 2.609.761	\$ 2.742.819	\$ 2.834.086	\$ 3.410.510	\$ 4.283.793	\$ 6.787.396	\$ 9.465.367	\$ 9.703.142
	N7	\$ 2.716.500	\$ 2.855.000	\$ 2.950.000	\$ 3.550.000	\$ 4.459.000	\$ 7.065.000	\$ 9.852.500	\$ 10.100.000

[illegible]

	Capacidad	7,5	8	10	15	20	25
	Operación	STD	STD	STD	STD	STD	STD
Costo operación C(t)	C1	\$ 1.064.358	\$ 1.135.315	\$ 1.419.144	\$ 2.128.716	\$ 4.565.340	\$ 3.547.860
	C2	\$ 1.064.358	\$ 1.157.574	\$ 1.419.144	\$ 2.782.742	\$ 3.325.224	\$ 3.547.860
	C3	\$ 1.475.750	\$ 1.839.382	\$ 1.758.147	\$ 3.380.530	\$ 3.634.456	\$ 3.756.660
	C4	\$ 2.924.561	\$ 2.122.527	\$ 2.000.323	\$ 3.003.675	\$ 4.318.331	\$ 5.185.746
	C5	\$ 1.859.349	\$ 1.686.411	\$ 2.130.273	\$ 3.717.571	\$ 5.384.077	\$ 6.221.234
	C6	\$ 1.671.938	\$ 1.783.401	\$ 2.692.091	\$ 3.991.422	\$ 6.124.238	\$ 5.697.646
	C7	\$ 1.820.713	\$ 2.455.591	\$ 4.334.026	\$ 5.153.165	\$ 11.069.909	\$ 5.800.893
Salvamento S(t)	S1	\$ 6.048.133	\$ 6.048.133	\$ 7.104.697	\$ 11.529.500	\$ 30.053.791	\$ 37.734.375
	S2	\$ 5.106.778	\$ 5.106.778	\$ 5.987.247	\$ 9.716.250	\$ 25.153.159	\$ 31.553.645
	S3	\$ 4.165.422	\$ 4.165.422	\$ 4.869.798	\$ 7.903.000	\$ 20.252.527	\$ 25.372.916
	S4	\$ 3.224.067	\$ 3.224.067	\$ 3.752.348	\$ 6.089.750	\$ 15.351.895	\$ 19.192.187
	S5	\$ 2.282.711	\$ 2.282.711	\$ 2.634.899	\$ 4.276.500	\$ 10.451.264	\$ 13.011.458
	S6	\$ 1.341.356	\$ 1.341.356	\$ 1.517.449	\$ 2.463.250	\$ 5.550.632	\$ 6.830.729
	S7	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 650.000	\$ 650.000	\$ 650.000
Valor a nuevo	N1	\$ 9.507.959	\$ 9.507.959	\$ 11.168.928	\$ 18.124.934	\$ 47.246.019	\$ 59.320.270
	N2	\$ 9.739.953	\$ 9.739.953	\$ 11.441.450	\$ 18.567.183	\$ 48.398.822	\$ 60.767.685
	N3	\$ 9.928.908	\$ 9.928.908	\$ 11.663.414	\$ 18.927.386	\$ 49.337.759	\$ 61.946.578
	N4	\$ 10.292.306	\$ 10.292.306	\$ 12.090.295	\$ 19.620.128	\$ 51.143.521	\$ 64.213.823
	N5	\$ 10.989.095	\$ 10.989.095	\$ 12.908.808	\$ 20.948.411	\$ 54.605.937	\$ 68.561.098
	N6	\$ 11.620.968	\$ 11.620.968	\$ 13.651.064	\$ 22.152.945	\$ 57.745.779	\$ 72.503.362
	N7	\$ 12.096.266	\$ 12.096.266	\$ 14.209.393	\$ 23.059.000	\$ 60.107.581	\$ 75.468.749

	Capacidad (Tr)	7,5	8	10	15	20	25
	Operación	STD	STD	STD	STD	STD	STD
RESULTADOS	Etapas						
	t1	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t2	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t3	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t4	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t5	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t6	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER
	t7	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER	MANTENER

ETAPA 6

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) - S(t+1)$	$C(0) - S(t) - S(1) + N(t)$		
1	-\$ 6.933.508	-\$ 2.363.101	-\$ 6.933.508	MANTENER
2	-\$ 4.522.470	-\$ 189.648	-\$ 4.522.470	MANTENER
3	-\$ 3.086.075	\$ 2.316.344	-\$ 3.086.075	MANTENER
4	\$ 15.441.071	\$ 5.457.877	\$ 5.457.877	REEMPLAZAR
5	\$ 1.528.172	\$ 8.475.661	\$ 1.528.172	MANTENER
6	\$ 4.503.165	\$ 11.194.966	\$ 4.503.165	MANTENER

ETAPA 5

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i-1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i-1}(1)$		
1	-\$ 1.739.728	\$ 6.803.297	-\$ 1.739.728	MANTENER
2	\$ 294.455	\$ 8.976.751	\$ 294.455	MANTENER
3	\$ 18.444.747	\$ 11.482.743	\$ 11.482.743	REEMPLAZAR
4	\$ 21.245.744	\$ 14.624.276	\$ 14.624.276	REEMPLAZAR
5	\$ 8.494.587	\$ 17.642.059	\$ 8.494.587	MANTENER

ETAPA 4

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i-1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i-1}(1)$		
1	\$ 3.077.197	\$ 15.969.696	\$ 3.077.197	MANTENER
2	\$ 21.825.277	\$ 18.143.149	\$ 18.143.149	REEMPLAZAR
3	\$ 24.249.419	\$ 20.649.141	\$ 20.649.141	REEMPLAZAR
4	\$ 28.212.158	\$ 23.790.674	\$ 23.790.674	REEMPLAZAR

ETAPA 3

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i-1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i-1}(1)$		
1	\$ 24.608.019	\$ 25.136.094	\$ 24.608.019	MANTENER
2	\$ 27.629.949	\$ 27.309.548	\$ 27.309.548	REEMPLAZAR
3	\$ 31.215.834	\$ 29.815.540	\$ 29.815.540	REEMPLAZAR

ETAPA 2

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i-1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i-1}(1)$		
1	\$ 24.847.207	\$ 34.302.493	\$ 24.847.207	MANTENER
2	\$ 27.835.303	\$ 36.475.946	\$ 27.835.303	MANTENER

ETAPA 1

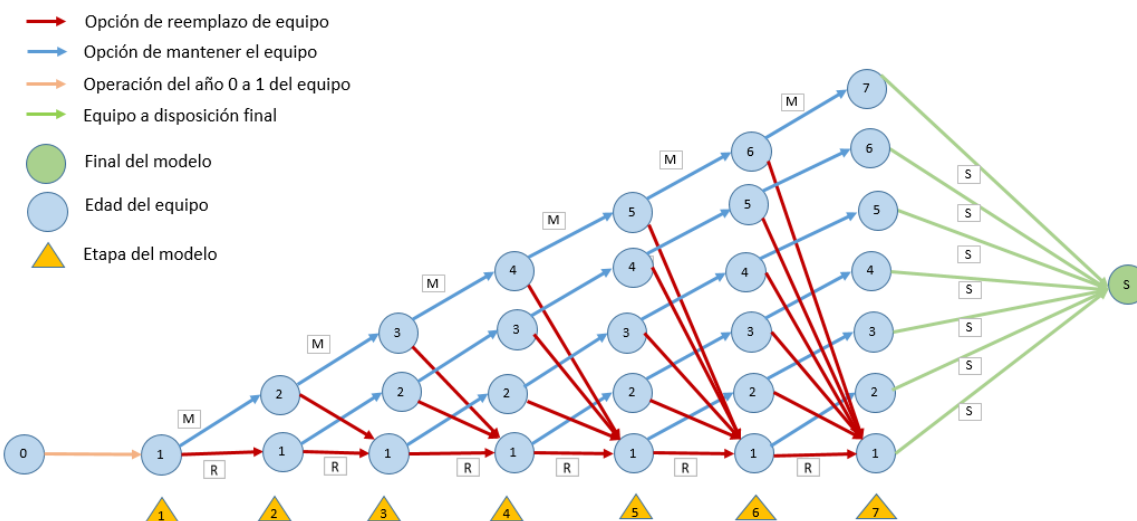
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i-1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i-1}(1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i-1}(1)$	
1	\$ 30.618.045	\$ 43.468.892	\$ 30.618.045	MANTENER

Etapas	Edad del equipo	Decisión
Etapas 1	1	MANTENER
Etapas 2	2	MANTENER
Etapas 3	3	REEMPLAZAR
Etapas 4	1	MANTENER
Etapas 5	2	MANTENER
Etapas 6	3	MANTENER

ANEXO 4.

Programación dinámica para equipo de 7.5 toneladas de refrigeración con fallo por compresor

Año	Tiempo (años)	Costo de peracion	Salvamento, S(t)	máquina nueva N(t)
2012	0	\$ 1.064.358		\$ 9.507.959
2013	1	\$ 1.064.358	\$ 6.048.133	\$ 9.739.953
2014	2	\$ 1.475.750	\$ 5.106.778	\$ 9.928.908
2015	3	\$ 2.924.561	\$ 4.165.422	\$ 10.292.306
2016	4	\$ 1.859.349	\$ 3.224.067	\$ 10.989.095
2017	5	\$ 8.715.938	\$ 2.282.711	\$ 11.620.968
2018	6	\$ 1.820.713	\$ 1.341.356	\$ 12.096.266
			\$ 400.000	



ETAPA 6

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) - S(t+1)$	$C(0) - S(t) - S(1) + N(t)$		
1	-\$ 4.042.420	-\$ 1.291.955	-\$ 4.042.420	MANTENER
2	-\$ 2.689.672	-\$ 161.644	-\$ 2.689.672	MANTENER
3	-\$ 299.506	\$ 1.143.109	-\$ 299.506	MANTENER
4	-\$ 423.362	\$ 2.781.254	-\$ 423.362	MANTENER
5	\$ 7.374.583	\$ 4.354.482	\$ 4.354.482	REEMPLAZAR
6	\$ 1.420.713	\$ 5.771.136	\$ 1.420.713	MANTENER

ETAPA 5

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_i \cdot q(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_i \cdot q(1)$		
1	-\$ 1.625.314	\$ 3.464.223	-\$ 1.625.314	MANTENER
2	\$ 1.176.244	\$ 4.594.534	\$ 1.176.244	MANTENER
3	\$ 2.501.198	\$ 5.899.287	\$ 2.501.198	MANTENER
4	\$ 9.233.931	\$ 7.537.432	\$ 7.537.432	REEMPLAZAR
5	\$ 10.136.651	\$ 9.110.661	\$ 9.110.661	REEMPLAZAR

ETAPA 4

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_i \cdot q(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_i \cdot q(1)$		
1	\$ 2.240.602	\$ 8.220.401	\$ 2.240.602	MANTENER
2	\$ 3.976.948	\$ 9.350.712	\$ 3.976.948	MANTENER
3	\$ 12.158.492	\$ 10.655.466	\$ 10.655.466	REEMPLAZAR
4	\$ 11.996.000	\$ 12.293.610	\$ 11.996.000	MANTENER

ETAPA 3

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_i \cdot q(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_i \cdot q(1)$		
1	\$ 5.041.306	\$ 12.976.580	\$ 5.041.306	MANTENER
2	\$ 13.634.242	\$ 14.106.890	\$ 13.634.242	MANTENER
3	\$ 14.920.560	\$ 15.411.644	\$ 14.920.560	MANTENER

ETAPA 2

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_i \cdot q(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_i \cdot q(1)$		
1	\$ 12.569.884	\$ 17.732.758	\$ 12.569.884	MANTENER
2	\$ 13.444.810	\$ 18.863.068	\$ 13.444.810	MANTENER

ETAPA 1

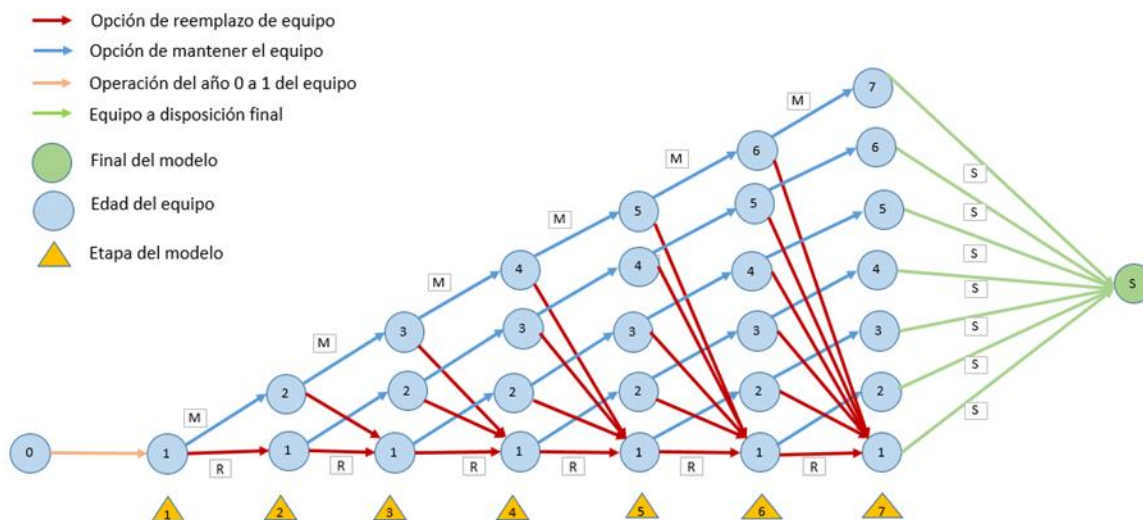
Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_i \cdot q(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_i \cdot q(1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_i \cdot q(1)$	
1	\$ 14.509.168	\$ 22.488.936	\$ 14.509.168	MANTENER

Etapas	Edad del equipo	Decisión
Etapas 1	1	MANTENER
Etapas 2	2	MANTENER
Etapas 3	3	MANTENER
Etapas 4	4	MANTENER
Etapas 5	5	REEMPLAZAR
Etapas 6	1	MANTENER

ANEXO 5.

Programación dinámica para equipo de 1.0 toneladas de refrigeración incluyendo costos por consumo energético

Año	Tiempo (años)	Costo de operacion	Salvamento, S(t)	Costo de máquina nueva N(t)
2012	0	\$ 1.845.722		\$ 2.135.235
2013	1	\$ 1.879.799	\$ 1.358.250	\$ 2.187.335
2014	2	\$ 1.914.556	\$ 1.144.375	\$ 2.229.769
2015	3	\$ 2.005.530	\$ 930.500	\$ 2.311.379
2016	4	\$ 2.055.058	\$ 716.625	\$ 2.467.859
2017	5	\$ 2.104.067	\$ 502.750	\$ 2.609.761
2018	6	\$ 2.150.800	\$ 288.875	\$ 2.716.500
			\$ 75.000	



ETAPA 6

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) - S(t+1)$	$C(0) - S(t) - S(1) + N(t)$		
1	\$ 735.424	\$ 1.316.557	\$ 735.424	MANTENER
2	\$ 984.056	\$ 1.572.866	\$ 984.056	MANTENER
3	\$ 1.288.905	\$ 1.868.351	\$ 1.288.905	MANTENER
4	\$ 1.552.308	\$ 2.238.706	\$ 1.552.308	MANTENER
5	\$ 1.815.192	\$ 2.594.483	\$ 1.815.192	MANTENER
6	\$ 2.075.800	\$ 2.915.097	\$ 2.075.800	MANTENER

ETAPA 5

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 2.863.855	\$ 3.991.364	\$ 2.863.855	MANTENER
2	\$ 3.203.461	\$ 4.247.674	\$ 3.203.461	MANTENER
3	\$ 3.557.838	\$ 4.543.158	\$ 3.557.838	MANTENER
4	\$ 3.870.250	\$ 4.913.513	\$ 3.870.250	MANTENER
5	\$ 4.179.867	\$ 5.269.290	\$ 4.179.867	MANTENER

ETAPA 4

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 5.083.260	\$ 6.666.171	\$ 5.083.260	MANTENER
2	\$ 5.472.394	\$ 6.922.481	\$ 5.472.394	MANTENER
3	\$ 5.875.780	\$ 7.217.965	\$ 5.875.780	MANTENER
4	\$ 6.234.925	\$ 7.588.321	\$ 6.234.925	MANTENER

ETAPA 3

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 7.352.193	\$ 9.340.979	\$ 7.352.193	MANTENER
2	\$ 7.790.336	\$ 9.597.288	\$ 7.790.336	MANTENER
3	\$ 8.240.455	\$ 9.892.772	\$ 8.240.455	MANTENER

ETAPA 2

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 5.910.537	\$ 12.015.786	\$ 5.910.537	MANTENER
2	\$ 6.325.899	\$ 12.272.095	\$ 6.325.899	MANTENER

ETAPA 1

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	
1	\$ 8.205.697	\$ 14.690.593	\$ 8.205.697	MANTENER

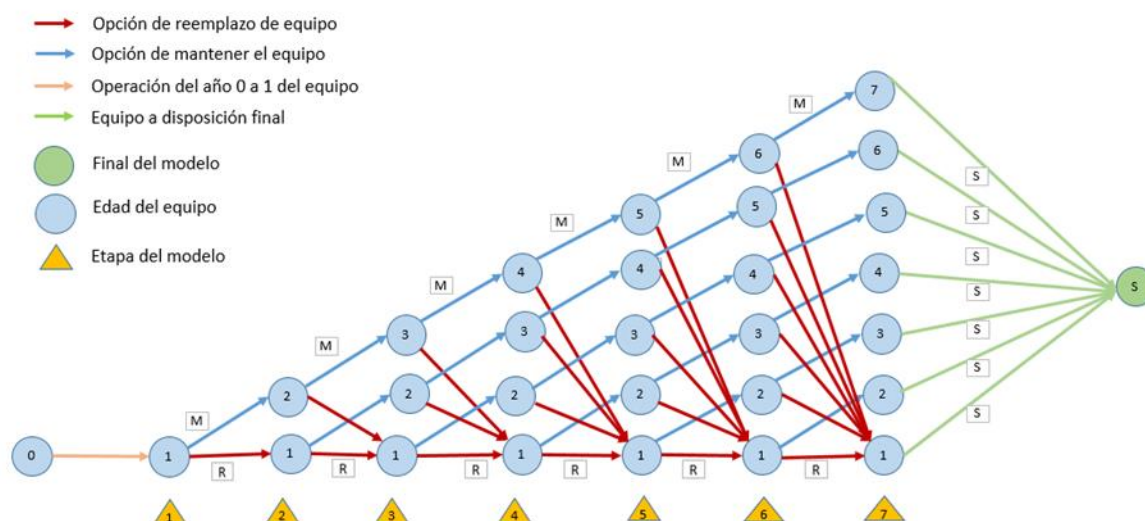
Etapas	Edad del equipo	Decisión
Etapas 1	1	MANTENER
Etapas 2	2	MANTENER
Etapas 3	3	MANTENER
Etapas 4	4	MANTENER
Etapas 5	5	MANTENER
Etapas 6	6	MANTENER

ANEXO 6.

Programación dinámica para equipo de 1.0 toneladas de refrigeración con operación 24

horas y vida útil extendida a 7 años

Año	Tiempo (años)	Costo de peracion C	Salvamento, S(t)	Costo de máquina nueva N(t)
2012	0	\$ 141.914		\$ 2.135.235
2013	1	\$ 141.914	\$ 1.358.250	\$ 2.187.335
2014	2	\$ 141.914	\$ 1.144.375	\$ 2.229.769
2015	3	\$ 319.341	\$ 930.500	\$ 2.311.379
2016	4	\$ 252.561	\$ 716.625	\$ 2.467.859
2017	5	\$ 864.530	\$ 502.750	\$ 2.609.761
2018	6	\$ 232.036	\$ 288.875	\$ 2.716.500
			\$ 75.000	



ETAPA 6

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) - S(t+1)$	$C(0) - S(t) - S(1) + N(t)$		
1	-\$ 1.002.461	-\$ 387.251	-\$ 1.002.461	MANTENER
2	-\$ 788.586	130.942	-\$ 788.586	MANTENER
3	-\$ 397.284	164.543	-\$ 397.284	MANTENER
4	-\$ 250.189	534.898	-\$ 250.189	MANTENER
5	\$ 575.655	890.675	\$ 575.655	MANTENER
6	\$ 157.036	1.211.289	\$ 157.036	MANTENER

ETAPA 5

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	-\$ 646.671	\$ 583.748	-\$ 646.671	MANTENER
2	-\$ 255.369	840.058	-\$ 255.369	MANTENER
3	\$ 69.153	1.135.542	\$ 69.153	MANTENER
4	\$ 828.216	1.505.897	\$ 828.216	MANTENER
5	\$ 1.021.566	1.861.674	\$ 1.021.566	MANTENER

ETAPA 4

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	-\$ 113.455	\$ 1.554.747	-\$ 113.455	MANTENER
2	\$ 211.067	1.811.057	\$ 211.067	MANTENER
3	\$ 1.147.558	2.106.541	\$ 1.147.558	MANTENER
4	\$ 1.274.127	2.476.897	\$ 1.274.127	MANTENER

ETAPA 3

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 352.981	\$ 2.525.747	\$ 352.981	MANTENER
2	\$ 1.289.472	2.782.056	\$ 1.289.472	MANTENER
3	\$ 1.593.468	3.077.540	\$ 1.593.468	MANTENER

ETAPA 2

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$		
1	\$ 1.147.558	\$ 3.496.746	\$ 1.147.558	MANTENER
2	\$ 1.451.554	3.753.055	\$ 1.451.554	MANTENER

ETAPA 1

Edad	Mantener	Reemplazar	Menor valor	Decisión
	$C(t) + f_{i+1}(t+1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	$C(0) - S(t) + N(t) + f_{i+1}(1)$	
1	\$ 1.593.468	\$ 4.467.745	\$ 1.593.468	MANTENER

Etapa	Edad del equipo	Decisión
Etapa 1	1	MANTENER
Etapa 2	2	MANTENER
Etapa 3	3	MANTENER
Etapa 4	4	MANTENER
Etapa 5	5	MANTENER
Etapa 6	6	MANTENER